

**IMPACTO POTENCIAL AMBIENTAL EN SISTEMAS PRODUCTIVOS DE
CAÑA DE AZUCAR A PARTIR DEL ANALISIS DEL CICLO DE VIDA**

MARIA CRISTINA CAICEDO BALANTA

Trabajo de Grado

Presentado como requisito parcial

Para obtener el título de Magister en Ecotecnología

Director:

Dr. Tito Morales Pinzón

**FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN ECOTECNOLOGÍA
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
PEREIRA, RISARALDA**

2021

Dedicatoria

A mi mama, mis Hijos, mis Hermanos
Y a ti Compañero de Vida

“Solo cuando el ultimo árbol este muerto,
El ultimo rio envenenado y el último pez
Atrapado, te darás cuenta que no puedes
Comer dinero”

Proverbio Indoamericano

Agradecimientos

A Diomira mi mamá, por su incansable apoyo y amor durante toda mi vida, en esta meta hoy lograda como en todas las áreas de mi formación personal y profesional.

A miguel Ángel y Sara Lucia mis hijos, que siempre serán gran inspiración y motor para alcanzar metas

A mis hermanos por su apoyo incondicional, aun cuando creo que no puedo más, siempre están ahí para levantarme y mostrarme que puedo llegar

A Edward que me impulso con sus consejos y ha estado ahí para compartir mi esfuerzo

Al profesor Tito, por creer en mí y en mi proyecto, por apoyarme con su guía y conocimiento, por su empeño para sacar la investigación adelante.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	1
1 INTRODUCCIÓN	2
2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	5
3 OBJETIVOS.....	6
4 MARCO DE REFERENCIA	7
4.2 INDUSTRIA AZUCARERA EN EL VALLE DEL RÍO CAUCA.....	11
4.3 ASPECTOS DEL CULTIVO Y AMBIENTALES	12
4.4 COMO SE CULTIVA LA CAÑA DE AZÚCAR	14
4.6 ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA.....	20
4.7 ESTRUCTURA Y COMPONENTES DE UN ACV.....	21
4.9 ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE.....	30
5 METODOLOGÍA.....	31
5.2.1 Programación de visitas en campo.....	33
5.3.1 Fase 1. Definición del objetivo y el alcance del estudio.....	35
5.3.2 Fase 2. Análisis del inventario del ciclo de vida (ICV)	38
5.3.3 Fase 3. Evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV).....	39
5.3.4 Fase 4. Interpretación de Ciclo de vida.....	41

5.3.5	<i>Escenarios de reducción de impactos ambientales</i>	41
6	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	44
6.1	INVENTARIO DEL CULTIVO DE CAÑA	44
6.2	EVALUACIÓN DEL IMPACTO POTENCIAL MEDIOAMBIENTAL	51
6.2.1	<i>Impactos potenciales de punto medio</i>	52
6.2.2	<i>Análisis de incertidumbre</i>	54
6.2.3	<i>Árbol de impactos</i>	55
6.3	INTERPRETACIÓN DE LOS PRINCIPALES HALLAZGOS DE LOS RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN MEDIOAMBIENTAL DEL INVENTARIO DE CICLO DE VIDA	63
6.4	POTENCIAL DE PRÁCTICAS DE MEJORA DEL SISTEMA PRODUCTIVO	67
6.5	ANÁLISIS DE LA MODELACIÓN DE ESCENARIOS	69
7	CONCLUSIONES	74
8	RECOMENDACIONES Y POSIBLES ÁMBITOS DE INVESTIGACIÓN FUTURA	76
9	REFERENCIAS	78
10	ANEXOS	82
10.4	IMPACTOS AMBIENTALES DE PUNTO MEDIO PARA UNA HECTÁREA DE CAÑA EN SOCA (RECIPEMIDPOINT (H) V1.12 / EUROPE RECIPE H)	85
10.5	CARACTERIZACIÓN A NIVEL MEDIO (GOEDKOOP, 2009)	86

10.5.1	<i>El Factor de agotamiento del ozono.....</i>	86
10.5.2	<i>Toxicidad humana y ecotoxicidad</i>	86
10.5.3	<i>Radiación.....</i>	86
10.5.4	<i>Formación e oxidantes fotoquímicos.....</i>	86
10.5.5	<i>Formación de partículas.....</i>	86
10.5.6	<i>Cambio Climático.....</i>	87
10.5.7	<i>Ocupación de suelo agrícola y urbano.....</i>	87
10.5.8	<i>Transformación de tierras naturales</i>	87
10.5.9	<i>Eutrofización marina.....</i>	87
10.5.10	<i>Eutrofización de agua dulce.....</i>	87
10.5.11	<i>Agotamiento de minerales y combustibles fósiles.....</i>	87
10.5.12	<i>Agotamiento de minerales.....</i>	88
10.5.13	<i>Agotamiento de agua dulce.....</i>	88
10.6	IMPACTOS AMBIENTALES DE PUNTO MEDIO POR TONELADA DE CAÑA PRODUCIDA EN DIFERENTES PAÍSES DEL MUNDO SEGÚN SIMAPRO (ReCiPe Midpoint (H) V1.12 / Europe Recipe H).....	89
10.7	ANEXO FOTOGRÁFICO (FUENTE PROPIA CASO DE ESTUDIO).....	90

Listado de tablas

TABLA 1. RENDIMIENTO APROXIMADO DE ALGUNOS EQUIPOS UTILIZADOS PARA LA NIVELACIÓN DE TERRENOS CULTIVADOS CON CAÑA DE AZÚCAR EN EL VALLE DEL CAUCA (CENICAÑA, 1995).....	13
TABLA 2. ALGUNAS METODOLOGÍAS PARA LA EVALUACIÓN DEL IMPACTO MEDIOAMBIENTAL USANDO LA METODOLOGÍA DE ACV	27
TABLA 3. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LAS CATEGORÍAS DE PUNTO MEDIO E INDICADORES DE IMPACTO RELACIONADOS EN ReCiPe 2016.....	28
TABLA 4. ALGUNOS SOFTWARES USADOS EN EL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA	30
TABLA 5: MODELO DE PREGUNTAS BASE PARA ENTREVISTA EN CAMPO.....	33
TABLA 6. UNIDAD FUNCIONAL Y DEFINICIÓN DEL FLUJO DE REFERENCIA	37
TABLA 7. RENDIMIENTO PROMEDIO EN LAS DIFERENTES SUERTES DE LAS FINCAS PRODUCTORAS	44
TABLA 8. RENDIMIENTO PROMEDIO SEGÚN LAS VARIEDADES DE CAÑA USADAS.....	45
TABLA 9. INVENTARIO DE CONSUMOS DE COMBUSTIBLE (DIÉSEL) POR USO DE MAQUINARIA EN PLANTILLA	46
TABLA 10. INVENTARIO DE CONSUMOS DE COMBUSTIBLE (DIÉSEL) POR USO DE MAQUINARIA EN SOCA.....	46
TABLA 11. INVENTARIO DE CONSUMOS DE COMBUSTIBLE (DIÉSEL) POR USO DE MAQUINARIA EN PROCESO DE SIEMBRA MANUAL	47

TABLA 12. INVENTARIO DE MATERIALES Y CONSUMO DE COMBUSTIBLE EN PROCESO DE RIEGO	48
TABLA 13. INVENTARIO DE INSUMOS REQUERIDOS EN PROCESO DE FERTILIZACIÓN.....	48
TABLA 14. INVENTARIO PARA MODELAR EL COMPUESTO NITRA.....	49
TABLA 15. INVENTARIO DE INSUMOS REQUERIDOS EN PROCESO DE CONTROL DE ARVENSES.	50
TABLA 16. INVENTARIO DE INSUMOS, EQUIPOS Y CONSUMOS DE COMBUSTIBLE PARA PROCESO DE COSECHA.....	50
TABLA 17. IMPACTOS POTENCIALES MEDIOAMBIENTALES POR TONELADA DE CAÑA PRODUCIDA	54

Listado de Figuras

FIGURA 1. INDICADOR DE PRODUCTIVIDAD MUNDIAL DE AZÚCAR (TON/HA) (ASOCAÑA, 2020)	11
FIGURA 2. CICLO DE CULTIVO DE CONVENCIONAL DE LA CAÑA DE AZÚCAR	15
FIGURA 3. TIPOS DE RIEGO EN EL CULTIVO DE CAÑA DE AZÚCAR	18
FIGURA 4. LÓGICA DE APLICACIÓN DE UN ACV (STARK ET AL., 2016).....	21
FIGURA 5. ETAPAS DE UN ACV (ICONTEC, 2007)	22
FIGURA 6. ALCANCE DE UN ACV FUENTE: IHOBE (2009).....	24
FIGURA 7. RESUMEN DE LAS CATEGORÍAS DE IMPACTO QUE SE CUBREN EN LA METODOLOGÍA RECiPE2016 Y SU RELACIÓN CON LAS ÁREAS DE PROTECCIÓN.	29
FIGURA 8: INFOGRAFÍA IMPACTO POTENCIAL AMBIENTAL EN SISTEMAS PRODUCTIVOS	34
FIGURA 9. COMPARACIÓN DE LOS IMPACTOS POTENCIALES EN PUNTO MEDIO PARA LAS DIFERENTES FINCAS Y SUERTES ANALIZADAS	52
FIGURA 10. ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE MEDIANTE EL MUESTREO MONTE CARLO PARA EL SISTEMA DE PRODUCCIÓN B2	55
FIGURA 11. ÁRBOL DE CONTRIBUCIONES AL POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL EN PLANTILLA B2.....	56
FIGURA 12. ÁRBOL DE CONTRIBUCIONES AL POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL EN SOCA A3	57
FIGURA 13. ESTRUCTURA GENERAL DE LAS CONTRIBUCIONES AL POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL POR LA PREPARACIÓN DEL LOTE DE UNA HA DE CAÑA EN PLANTILLA	58

FIGURA 14. ESTRUCTURA GENERAL DE LAS CONTRIBUCIONES AL POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL POR LA PREPARACIÓN DEL LOTE DE UNA HA DE CAÑA EN SOCA	58
FIGURA 15. ESTRUCTURA GENERAL DE LAS CONTRIBUCIONES AL POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL POR SIEMBRA DE UNA HA DE CAÑA	59
FIGURA 16. ESTRUCTURA GENERAL DE LAS CONTRIBUCIONES AL POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL POR CONTROL DE ARVENSES EN UNA HA DE CAÑA	60
FIGURA 17. ESTRUCTURA GENERAL DE LAS CONTRIBUCIONES AL POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL POR FERTILIZACIÓN DE UNA HA DE CAÑA	61
FIGURA 18. ESTRUCTURA GENERAL DE LAS CONTRIBUCIONES AL POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL POR RIEGO DE UNA HA DE CAÑA.....	62
FIGURA 19. ESTRUCTURA GENERAL DE LAS CONTRIBUCIONES AL POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL POR COSECHA DE UNA HA DE CAÑA	63
FIGURA 20. IMPACTOS AMBIENTALES DE PUNTO MEDIO PARA EL CULTIVO DE CAÑA EN SISTEMA B2 (ReCiPe Midpoint (H) V1.12 / Europe Recipe H)	64
FIGURA 21. IMPACTOS AMBIENTALES DE PUNTO MEDIO PARA EL CULTIVO DE CAÑA EN SISTEMA A3 (ReCiPe Midpoint (H) V1.12 / Europe Recipe H).....	65
FIGURA 22. DISTRIBUCIÓN DE LA PROPIEDAD DE LA TIERRA EN CAÑA	68
FIGURA 23. IMPACTOS AMBIENTALES DEL SISTEMA ACTUAL PLANTILLA VS EL ESCENARIO S- E1	72
FIGURA 24. IMPACTOS AMBIENTALES DEL SISTEMA ACTUAL SOCA VS LOS ESCENARIOS S- E2, S-E3 Y S-E4	73

Listado de Fotografías

FOTO 1: TRACTOR ENLLANTADO CON SUBSOLADOR UTILIZADO PARA DESCOMPACTAR EL SUELO, LOGRANDO INFILTRACIÓN DE AGUA Y RETENCIÓN DE HUMEDAD	90
FOTO 2: BULDOZER O TRACTOR DE ORUGA UTILIZADO EN LA ADECUACIÓN/NIVELACIÓN DE SUELOS PARA LA SIEMBRA. TAMBIÉN SE USA EN LA ELABORACIÓN DE CABECERAS Y DRENAJES EN CADA SUERTE.	90
FOTO 3. ESTACIÓN DE BOMBEO QUE DERIVA AGUAS DEL RIO CAUCA A CANAL ABIERTO POR TUBERÍAS	91
FOTO 4: COMPUERTA DE DERIVACIÓN DE AGUAS A CANALES CONTIGUOS A CADA SUERTE PARA INSTALACIÓN DE RIEGO POR VENTANAS.....	91
FOTO 5: RESERVORIO ALIMENTADO POR AGUAS LLUVIAS Y POR MEDIO DE LAS COMPUERTAS QUE DERIVAN AGUAS DEL RIO CAUCA	92
FOTO 6: RESERVORIO 2 ALIMENTADO POR AGUAS LLUVIAS Y POR MEDIO DE LAS COMPUERTAS QUE DERIVAN AGUAS DEL RIO CAUCA	92
FOTO 7: DEFINICIÓN DE SURCOS PARA SIEMBRA DE ESQUEJES	93
FOTO 8: DEFINICIÓN DE SURCOS EN PRESENCIA DE RESIDUOS DE COSECHA	93
FOTO 9: PLANTILLA DE 3 MESES DE EDAD.....	94
FOTO 10: RIEGO POR GRAVEDAD EN SURCOS	94
FOTO 11: CULTIVO DE CAÑA DE 5 MESES DE EDAD	95
FOTO 12: AVIONETA REALIZANDO APLICACIÓN DE MADURANTES EN EL CULTIVO DE CAÑA DE AZÚCAR.....	95

Resumen

En este trabajo investigativo se aplicó la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), cuantificando los impactos potenciales ambientales generados en la producción de caña de azúcar en base a registros históricos del sector, en tres fincas productoras del Norte del Valle del río Cauca. El límite del estudio fue de la Cuna a la Puerta involucrando: establecimiento del cultivo, la siembra, riego fertilización, control de arvenses y la cosecha. Se definen los procesos unitarios incluidos en el sistema productivo, resaltando entradas y salidas entre los límites y actividades referentes a la cadena de suministros. El productor puede determinar el uso que le está dando a los insumos y procesos que tiene a su disposición y el impacto potencial medio ambiental que está generando con las prácticas agrícolas que realiza, así como las acciones para reducirlo, siendo el propósito de este estudio.

El análisis fue realizado en suertes, con datos comprendidos en un periodo de 10 años, cuyo propósito es evaluar el peso relativo y la relevancia de cada uno de los impactos medioambientales potenciales, evaluados empleando los datos del inventario y el Software Simapro Analyst Version 8.2.3 aplicando el método Recipe que ha sido aplicado en estudios que sirven de referente.

Los resultados muestran que la explotación de caña de azúcar puede generar un gran impacto ambiental donde estimó un impacto ambiental por Potencial de Calentamiento Global (PCG) entre 32,7 y 55,4 kg CO₂ eq./ton de caña producida en soca y plantilla, respectivamente, con variaciones dependiendo de la suerte y del sector de la finca. Las mayores contribuciones para el PCG en plantilla fueron un 63,1% para la etapa de fertilización y 12,8 % para preparación del terreno mientras que en soca 68,7% para fertilización y 7,3% para cosecha. Además, se evidenció que el mayor aporte en este impacto en la fase de fertilización viene dado por las emisiones residuales al ambiente y en cuanto a los químicos usados, se destaca la contribución por el uso de urea. Como alternativas de reducción del impacto se evidenció que el mejor escenario se presenta cuando se sustituye la cosecha mecánica y se reemplaza por cosecha manual.

1 INTRODUCCIÓN

A nivel mundial los modelos de desarrollo han hecho a un lado la importancia del medio ambiente, empeorando la situación actual; la producción de biocombustibles a partir de la agricultura ha denominado a cultivos como la caña de azúcar, “cultivos energéticos” (Christoforou et al., 2016).

Las condiciones medioambientales actuales han concentrado preocupación en todos los sectores, principalmente en la agroindustria. El cultivo de caña de azúcar a este nivel, plantea serias dudas sobre su sustentabilidad; la rápida expansión del cultivo debido al incremento de la sustitución de combustibles fósiles y el cambio del uso y vocación agrícola del suelo determinado por la tenencia, inciden en la afectación medioambiental (Bordonal et al., 2017).

De igual manera el incremento de la mecanización en la industria agrícola, consumo de agua, uso del suelo y cambio climático están definiendo el sentido actual de muchas políticas generadas a nivel nacional y regional para contrarrestar efectos de las actividades económicas sobre el entorno y sobre la sostenibilidad de las prácticas agrícolas implementadas actualmente, ya que han perturbado gradualmente a lo largo de los años aire, agua, suelos y consecuentemente los ecosistemas que se desarrollan en ellos (Iriarte, 2016).

Ambientalmente una de las mayores amenazas de la expansión de los cultivos de caña de azúcar de forma intensiva es la conversión de ecosistemas vírgenes; la deforestación por ejemplo es la causa del desplazamiento y extinción de algunas especies y sus hábitats, así como la pérdida de algunas funciones de los ecosistemas. Los estudios revelan que la tala de bosques puede afectar el clima, reduciendo lluvias e incrementando temperaturas (Goldemberg, J., et al., 2008; Blank Consultants.,2014).

Para llegar al punto de la sostenibilidad en cultivos de impacto como la caña de azúcar la perspectiva de análisis debe ser global. En Expocaña Internacional 2016 se resaltó el rol de

las empresas dedicadas al cultivo de la caña de azúcar como generadoras de desarrollo y empleo en las regiones donde predomina dicho cultivo y a su vez, en este mismo evento donde se concentraron los principales países productores de caña; el Departamento de Ciencias Ambientales de Suiza advirtió la importancia de las mejoras en las prácticas agrícolas en el cultivo de la caña de azúcar para mitigar los efectos nocivos al medio ambiente (Cenicaña, 2016).

La expansión de los cultivos de Caña de azúcar en el Norte del Valle es una realidad que sigue los modelos de desarrollo mundiales ligado a factores como el desarrollo de la producción de biocombustibles a partir de la caña y la tenencia de la tierra, la cual determina su destinación a uso. Como toda actividad agrícola intensiva implica transformación y sobreexplotación de los recursos naturales para mayor rentabilidad y optimización del uso del suelo y el agua, situación que ha ido modificando a lo largo de los años el paisaje, generando problemáticas ambientales como la erosión, contaminación por el uso de herbicidas y agroquímicos en aguas subterráneas y fuentes cercanas (río Cauca), compactación de suelos por mecanización y pérdida de hábitat nativo, entre otros (Contreras et al., 2009; Amin Tayebi et al., 2015).

La evaluación económica es definitiva para el propietario de la tierra y del cultivo, que en caña en muchas ocasiones son distintos; pero en definitiva lo primordial radica en la evaluación medioambiental pues me determina la calidad del uso que le están dando a los recursos naturales y permitirá reducir los impactos asociados a la actividad y así hacerla sustentable en el tiempo (Contreras et al., 2009).

En los últimos años la preocupación en el sector agrario ha sido procurar abonos orgánicos o químicos que mejoren la productividad de la tierra para mayor rentabilidad del cultivo; sin embargo, son escasos los estudios sobre garantizar dicha fertilidad a largo plazo sin que genere impactos medioambientales considerables en el proceso agrícola (Delgadillo-Vargas et al., 2016).

Hoy día la sostenibilidad del cultivo a nivel agroindustrial, intenta abordar impactos mundiales como: la degradación de los recursos bióticos, la deforestación y el agotamiento de la capa de ozono, al igual que problemáticas en el entorno de los cultivos: ecosistemas, sociosistemas y el tema de calidad de agua (superficiales y subterráneas) se enmarca en los niveles de fósforo en aguas superficiales, contaminación con pesticidas así como la percolación de sales minerales en el suelo, (Environmental Indicators for Agriculture Methods and Results Executive Summary 2001), y la ordenación sostenible de la tierra; donde se considera la armonía entre la aplicación de una tecnología adecuada, los recursos ambientales disponibles(clima, aguas, suelo y plantas) , la problemática social (tenencia de la tierra, presión laboral y demográfica) y lo Económico (capital y mercado) (Zinck and Farshad, 1995).

Martha Betancourt, directora ejecutiva de Procaña, en el 2014 explicó que se había llegado al límite del área sembrada en caña en el Valle geográfico del río Cauca, por lo que desde entonces los ingenios azucareros han venido tomando medidas tanto para optimizar el área sembrada, para expandir el cultivo incluso a otros departamentos y así poder lograr grandes unidades productivas.

En el Valle del Cauca la tendencia en la agroindustria de la caña es que los pequeños ingenios según su capacidad de producción como La Cabaña, Risaralda, Pichichí, San Carlos, Carmelita, Central Tumaco y María Luisa que alcanzaron capacidad diaria hacia el 2014 según Asocaña de 5.000 toneladas, 5.000, 4.400, 2.000, 2.500, 2.000 y 800, respectivamente., sean absorbidos por los grandes Ingenios como Incauca, Riopaila-Castilla, Providencia, Manuelita y Mayaguez, para lograr una consolidación del sector azucarero en el país. Lo cual plantea la necesidad de aplicar estrategias que conduzcan a reducir las huellas medioambientales negativas de la agroindustria de la caña de azúcar para hacer frente a las directrices para la sostenibilidad ambiental del sector.

2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La producción de la caña de azúcar es sin duda, la actividad agrícola más importante del valle geográfico del río Cauca y causante de impactos ambientales que afectan el aire, el agua y el suelo. Como principales causantes de dicho impacto se han identificado el uso excesivo de fertilizantes y abonos, así como la extracción de agua para el riego de los cultivos. Dentro de las labores agrícolas generalmente mecanizadas, se causan procesos de compactación del suelo, salinidad, problemas de drenaje y erosión, así como emisiones debido a las quemas ocasionadas en algunos cultivos.

Si bien se han realizado varios estudios ambientales sobre el cultivo de caña de azúcar y sus productos principales (alcohol carburante y azúcar), se observan importantes diferencias en las estimaciones de los potenciales impactos con diferentes metodologías. Se presume que muchos de las cantidades de insumos utilizados en esta actividad agrícola están subestimados o corresponden a promedios regionales, lo que dificulta la aplicación de recomendaciones específicas dirigidas a los productores. Existe entonces la necesidad de validar los resultados en diferentes casos de estudio que permitan conocer incorporar datos reales de campo e identificar las fuentes de dichos impactos para contribuir en la comprensión de la problemática ambiental y su solución.

Como pregunta de investigación se ha planteado la siguiente:

¿Qué componentes del sistema productivo de caña de azúcar pueden contribuir a reducir el impacto potencial ambiental en el valle geográfico del río Cauca, desde la perspectiva de la metodología de análisis de ciclo de vida?

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo General

Analizar impactos potenciales ambientales en sistemas productivos del cultivo de caña de azúcar en el valle geográfico del río Cauca desde el enfoque de ciclo de vida.

3.2 Objetivos Específicos

- Realizar un inventario de materiales y procesos involucrados en el cultivo de caña de azúcar desde una perspectiva de análisis de ciclo de vida.
- Determinar en la fase agrícola del cultivo de caña de azúcar, el grado de afectación medioambiental de las diferentes etapas del proceso productivo
- Evaluar escenarios de reducción del impacto potencial ambiental sobre el sistema productivo de la caña de azúcar.

4 MARCO DE REFERENCIA

4.1 Sobre la caña de azúcar y su cultivo

La caña no es sólo una planta que crece a un ritmo más rápido que otros cultivos comerciales, su composición química hace que se pueda transformar industrialmente en otros productos valiosos. Durante mucho tiempo el azúcar fue el producto principal del cultivo de caña de azúcar, recientemente el combustible con alcohol se ha vuelto muy importante dentro de los subproductos de la planta y actualmente ha generado gran expansión del cultivo en los principales países productores de caña de azúcar. Es uno de los cultivos más antiguos en el mundo, no se tienen datos concretos de cuándo inician su siembra, se cree que ésta empezó 3.000 años A.C. como un tipo de césped en la isla de Nueva Guinea y de allí se extendió a Borneo, Sumatra e India (Procaña, 2017).

La caña de azúcar *Sacharum officinarum* (también conocida como cañaduz o simplemente caña) se compone de 12 especies de gramíneas autóctonas del viejo mundo en especial del Sureste Asiático. Se clasifica como un pasto perenne que puede durar varias décadas produciendo con un período vegetativo que oscila entre uno y dos años dependiendo de la variedad y características de la zona donde se encuentre. En Colombia, por las condiciones climáticas tropicales propias del valle geográfico del río Cauca, se puede cosechar caña entre 12 a 14 meses en promedio (Asocaña, 2002).

En Colombia se plantó por primera vez en Santa María La Antigua del Darién en 1510. Dice la historia que Pedro de Heredia, fundador de Cartagena, introdujo la caña en la Costa Atlántica alrededor de 1533 y posteriormente Sebastián de Belalcázar, fundador de Santiago de Cali, la plantó en el Valle del Cauca, en su estancia en Yumbo en 1541. Hacia 1550 se fundaron tres ingenios a orillas del río Amaime y desde esta región se envió azúcar y miel a Panamá en 1588. Para 1721 había en el Valle del Cauca 33 trapiches en funcionamiento. La caña cultivada en ese entonces se denomina criolla, originada de las cañas introducidas por los españoles. Durante la visita de Alexander Humboldt,

considerado el ‘padre de la geografía moderna’ y un especialista en temas como la botánica, el clima y la geología, llegó la recomendación a los hacendados vallecaucanos de cultivar la variedad Tahití u Otahiti la cual fue introducida al Valle del Cauca entre 1802 y 1808 y se esparció por el territorio colombiano (Procaña, 2017).

Desde ese entonces, la expansión de los cultivos de caña va en aumento en especial en el departamento del Valle del Cauca, ligada a los modelos de desarrollo mundiales los cuales están condicionados por factores como la tenencia de la tierra lo cual determina su uso (Cenicaña, 2011).

De los 172 millones de toneladas producidas, Colombia es uno de los mayores productores y exportadores de azúcar del mundo (puesto 14 entre 110 productores y puesto 12 entre 115 exportadores mundiales, con base en el promedio 2014-2018), con una baja participación en la producción (1,3%) comparado con países como Brasil (26,9%), India (20,7%) y Tailandia (8,8%) (Asocaña, 2020).

Brasil es un productor líder de Etanol de caña de azúcar con un área cultivada de alrededor de 9,1 millones de hectáreas en 2015/2016 donde 3 millones de hectáreas son de 20 grupos extranjeros representando São Paulo más del 52% del total del área. Se proyecta que la producción de Etanol de caña de azúcar aumentará de los actuales 21 millones de litros a 61.600 millones de litros en el 2021, y se necesitará 6,4 millones de hectáreas de caña de azúcar para satisfacer la demanda, esta rápida expansión plantea numerosos problemas de sostenibilidad (Bardonal et al 2017).

El informe de Grain¹ sobre mega adquisiciones globales en el 2016, tiene como protagonista a Brasil, con cantidades de tierra adquiridas o gestionadas por extranjeros (Resumen 2017). Se resaltarán las inversiones en caña.

¹ Según la web oficial de GRAIN (disponible en <https://www.grain.org/>), esta “es una pequeña organización internacional sin fines de lucro que trabaja apoyando a campesinos y agricultores en pequeña escala y a movimientos sociales en sus luchas por lograr sistemas alimentarios basados en la biodiversidad y controlados comunitariamente”, encargada de “producir investigaciones y análisis independientes, impulsar la vinculación y el tejido de redes a nivel local, regional e internacional, y cultivar nuevas formas de

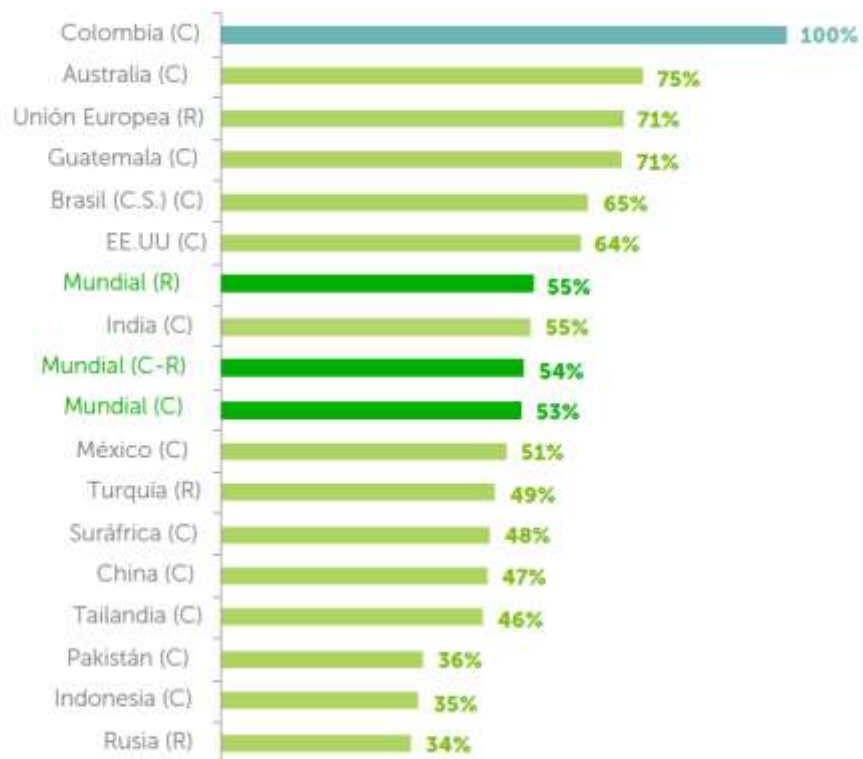
- 1) BrasilAgro, (argentina) (fue una inversión de George Soros y también tiene aporte chino), posee 166 mil hectáreas de caña, granos y pecuaria.
- 2) El fondo canadiense Brookfield Asset Management posee 97.127 hectáreas para producción de soya y caña de azúcar en tierras brasileñas. Y está buscando la adquisición de más ingenios.
- 3) Otra empresa estatal china: Cofco, aparece con 145 mil hectáreas de caña en el informe.
- 4) La francesa Louis Dreyfus Commodities aparece en el informe sobre land grabbing con nada menos que 430 mil hectáreas en Brasil. Para caña, arroz, naranjas y lácteos. Y además opera 500 mil hectáreas más, sin derecho de propiedad.
- 5) India también se hace presente en Brasil. Shree Renuka Sugars – aquí, Renuka de Brasil – posee 139 mil hectáreas de caña de azúcar, a partir de la compra, en los últimos años, de ingenios brasileños. El grupo Equipav posee 49,7% de las acciones.
- 6) El estadounidense Jorge Soros controla 127 mil hectáreas en Brasil, según Grain, por medio de Adecoagro, en asociación con un fondo de pensión holandés. La gama de cultivos es variada: café, caña, granos, pecuaria.
- 7) La multinacional Bunge, administra 230 mil hectáreas de caña de azúcar en Brasil, por medio de asociaciones, y además tiene 10 mil hectáreas del ingenio Guarani.
- 8) La caña de azúcar vuelve a aparecer en el informe con 35 mil hectáreas de la propia Cargill. Protierra Investment Partners invirtió, en 2015, US\$ 175 millones en ingenios en Brasil.
- 9) YBY Agro controla 320 mil hectáreas de tierras en Brasil. La empresa fue creada por ex-ejecutivos brasileños del Bank of América. Pero 45% de la compañía pertenece a fondos privados de los Estados Unidos. Otro 35% es del grupo brasileño Francioni Brothers y Golin. Las tierras quedan en el ‘cerrado’ [eco región de la sabana tropical brasileña con gran biodiversidad].

Como se puede ver en este informe la tendencia a nivel global es apostar en tierras para siembra de caña y granos en el principal país productor y exportador de caña de azúcar; el incremento de los cultivos, la tecnificación, así como la mecanización ha ido en aumento gracias a la inversión extranjera en la búsqueda de mayor productividad y mayor rentabilidad si detenerse en análisis sobre la expansión incontrolada dentro de dicho país. Este modelo se ha aplicado en la gran mayoría de países productores incluido Colombia.

Asocaña (2020) en su último informe revela que el clúster del azúcar en Colombia lo definen los departamentos de Valle del Cauca, Cauca, Quindío, Risaralda y Caldas; hasta el 2018 el área sembrada en caña de azúcar era de 253.534 ha (9,2% más que en 2015) donde el 75% de la tierra pertenece a 2.750 proveedores de caña y el 25 % restante pertenecen a 14 Ingenios, lo cual evidencia que la tenencia de la tierra determina su uso. La expansión es una de las alternativas para satisfacer la demanda, a pesar que el 2014 se dio el aviso de no haber más área para siembra, los cambios de vocación agrícola de los suelos van en aumento para satisfacer la demanda.

Los suelos del valle geográfico del río Cauca poseen propiedades fisicoquímicas que aportan nutrición a la gramínea produciendo un rendimiento por hectárea excepcional; principio que se ha tenido en cuenta a lo largo del territorio nacional donde la caña de azúcar está sembrada, llevando a posicionar a Colombia como el principal productor con mayor rendimiento por hectárea (Asocaña 2016). En esta zona se ubican 200.499 ha (Asocaña, 2020).

El rendimiento del cultivo en Colombia es el más alto del mundo y en 2019 fue de 111,70 TCH (toneladas de caña por ha) (Asocaña, 2020) (Figura 1).



* Se refiere a la cantidad de azúcares totales ajustado por edad de corte

(C): Caña

(R): Remolacha

Fuente: LMC International. www.lmc.co.uk

Figura 1. Indicador de Productividad Mundial de azúcar (ton/ha) (Asocaña, 2020)

4.2 Industria azucarera en el valle del río Cauca

La recopilación realizada por González (2020) establece que el inicio de se puede remontar al siglo XV cuando en 1533 Pedro de Heredia, trajo la caña de azúcar a Colombia. Posteriormente, en 1541 Sebastián de Belalcázar, en su estancia en Yumbo, plantó caña de azúcar en el Valle del Cauca. Entre 1550 y 1588 se fundaron tres ingenios a orillas del río Amaime y desde ésta región se envió azúcar y miel a Panamá. Posteriormente, entre 1802 y 1808 durante su visita a Colombia, Alexander von Humboldt, recomendó a los hacendados vallecaucanos la variedad Tahití u Otahití la cual fue introducida al Valle del Cauca y se esparció por el territorio colombiano. Desde 1900 a 1945 se dio la etapa de la industrialización y en 1953 existían 22 ingenios azucareros en el valle del río Cauca. Desde

1950 a 2002 se presenta la etapa de desarrollo del sector y en 1959 se inaugura ASOCAÑA². En 1977 se constituyó CENICAÑA³ como una corporación privada de carácter científico y tecnológico sin ánimo de lucro. A partir del 2002 se da la especialización del sector y en ese año se consolida la Red Meteorológica Automatizada a lo largo del Valle del Cauca y el Ministerio del Medio Ambiente elabora la Guía Ambiental para el Sector Azucarero. Resultado de la ley 693 (Congreso de la República, 2001) que obliga a oxigenar la gasolina vehicular con el 10% en volumen de alcohol carburante producido de biomas, varios ingenios establecen destilerías para producir etanol (Mayagüez, Providencia, Incauca, Risaralda y Manuelita en 2005 y Riopaila en 2015).

4.3 Aspectos del cultivo y ambientales

En gran medida, el aplicar una herramienta como el análisis de Ciclo de Vida en la agroindustria de la caña de azúcar, aporta información valiosa para determinar los mayores impactos potenciales ambientales que se producen en el cultivo lo cual es el objeto del presente trabajo; indicar de la cuna a la finca donde radican los impactos más sobresalientes para así mejorar las prácticas y reducir impactos (Moya et al., 2013).

El desarrollo de nuevas tecnologías en los últimos años ha permitido que el cultivo de caña avance y aumente su productividad, pero a la par han elevado los problemas medioambientales; Cenicaña Fundado en 1977 ha estandarizado metodologías para el cultivo de caña que hoy día en las fincas productoras siguen utilizando adaptadas claro está al funcionamiento de cada predio. La adecuación de tierras, control de enfermedades y plagas, elección de variedades, fertilización, riego, maduración de la caña y cosecha entre otros; son temas que han sido desarrollados por Cenicaña para guiar a los productores (Cenicaña, 1981).

² Es la Asociación de Cultivadores de Caña de Azúcar de Colombia, constituida como una entidad gremial sin ánimo de lucro, fundada el 12 de febrero de 1959, cuya misión es representar al Sector Agroindustrial de la Caña y promover su evolución y desarrollo sostenible.

³ La misión de Cenicaña es “Contribuir al desarrollo, competitividad y sostenibilidad del sector agroindustrial de la caña de azúcar de Colombia, mediante la generación de conocimiento y la innovación tecnológica, a través de la investigación, la transferencia de tecnología y la prestación de servicios especializados, con base en un sistema integrado de gestión para que el sector sobresalga en el mejoramiento socioeconómico y en la conservación ambiental de las zonas productoras de caña de azúcar”. Disponible en <https://www.cenicana.org/mision-y-vision/>

Dentro del cultivo todo empieza con la adecuación de tierras, lo que conlleva una inversión inicial onerosa, aproximadamente el 22% de los costos totales de la plantilla, teniendo como actividades: suministrar agua para riego y drenar excesos de la misma, siempre estar en mejora de la calidad de riego, los equipos y personal de campo, aumentar la productividad del cultivo y mantener vías de acceso al cultivo en buen estado. Teniendo los estudios pertinentes: suelos, topográficos, riego y drenaje se realiza el diseño de campo el cual, divide el área de siembra en sectores, suertes y tablones (Cenicaña 2015a).

Antes de nivelar el suelo se realiza la limpieza del mismo porque pueden ser terrenos con pasturas (vocación agrícola de otra índole), para lo que se utiliza según criterio del dueño del predio, animales de pastoreo, guadañas o quemas; los rastros se eliminan con tractores ya sean enllantados con cadenas o si está muy desarrollado con tractor de oruga al igual que para los bosques secundarios. Para destrucción de cepas cuando se piensa renovar las cepas del cultivo se utiliza tractores de oruga. Se continúa con la rastrillada la cual disminuye el tamaño de los terrones grandes que han quedado después de la destrucción de cepas, de esta manera queda el suelo más granulado y en óptimas condiciones para realizar una buena nivelación (Cenicaña 2015b).

Los equipos utilizados en la nivelación dependen del análisis hecho en el terreno, pendiente, movimiento de tierra, acarreo, son algunos factores a determinar para elegir el tipo de equipo a utilizar (Tabla 1).

Tabla 1. Rendimiento aproximado de algunos equipos utilizados para la nivelación de terrenos cultivados con caña de azúcar en el Valle del Cauca (Cenicaña, 1995)

<i>Tractor</i>	<i>Equipo</i>	<i>Rendimiento (horas- máquina/ha)</i>
<i>Con llantas, 375 a 475 HP</i>	Doble trailla de 15 y 18 yardas cúbicas cada una	3 a 6
<i>Con llantas, 165 HP</i>	Marconi velador (Micronivelación)	12 a 16

<i>De orugas</i>	Pala delantera	12 a 28
<i>Motoniveladora</i>	Pala y escarificador incorporados	1 a 3

Fuentes: Ingenio del cauca y central Castilla

Durante los recorridos en campo, es importante resaltar, que la gran mayoría de los predios cercanos al río Cauca tienen obras hidráulicas como jarillones, que sirven de protección por posibles inundaciones y desbordamientos. También disponen de obras para conducción de aguas como canales abiertos, bocatomas y almacenamiento de aguas en reservorios de aguas lluvias. Entre las opciones de riego, este generalmente se realiza por gravedad, también se realiza por tubería, por gravedad y canal abierto.

En el sistema de riego por gravedad, en plantilla se aplican riegos de germinación y riegos de levantamiento del cultivo desde los 45 ó 60 días de edad de la caña y hasta los 10 meses de edad, mientras que, en soca, las aplicaciones de riego se realizan 60 días después del corte y hasta los 10 meses de edad del cultivo, con tiempos de cosecha entre 12 y 14 meses de edad. Debido a que el objetivo del riego es suministrar al cultivo el volumen de agua necesario en el momento oportuno, por lograr un buen desarrollo de las plantas y alta productividad, se debe realizar un balance hídrico en el suelo para controlar mejor el suministro de agua (González, 2020).

4.4 Como se Cultiva la Caña de Azúcar

El cultivo de caña convencionalmente presenta 6 etapas: preparación del lote, siembra, control de malezas, fertilización, riegos y cosecha (Figura 2). Adicionalmente, se debe considerar que se llama plantilla al levante y desarrollo del primer corte, después de la preparación y adecuación, mientras que a los siguientes períodos se les llama socas, lo que conlleva a que, en plantilla, el desarrollo inicial de la caña es más lento que en socas, con

consecuentes manejos diferentes ajustados a estas fases del desarrollo del cultivo (Molina et al. 1998) (Cenicaña 2016).

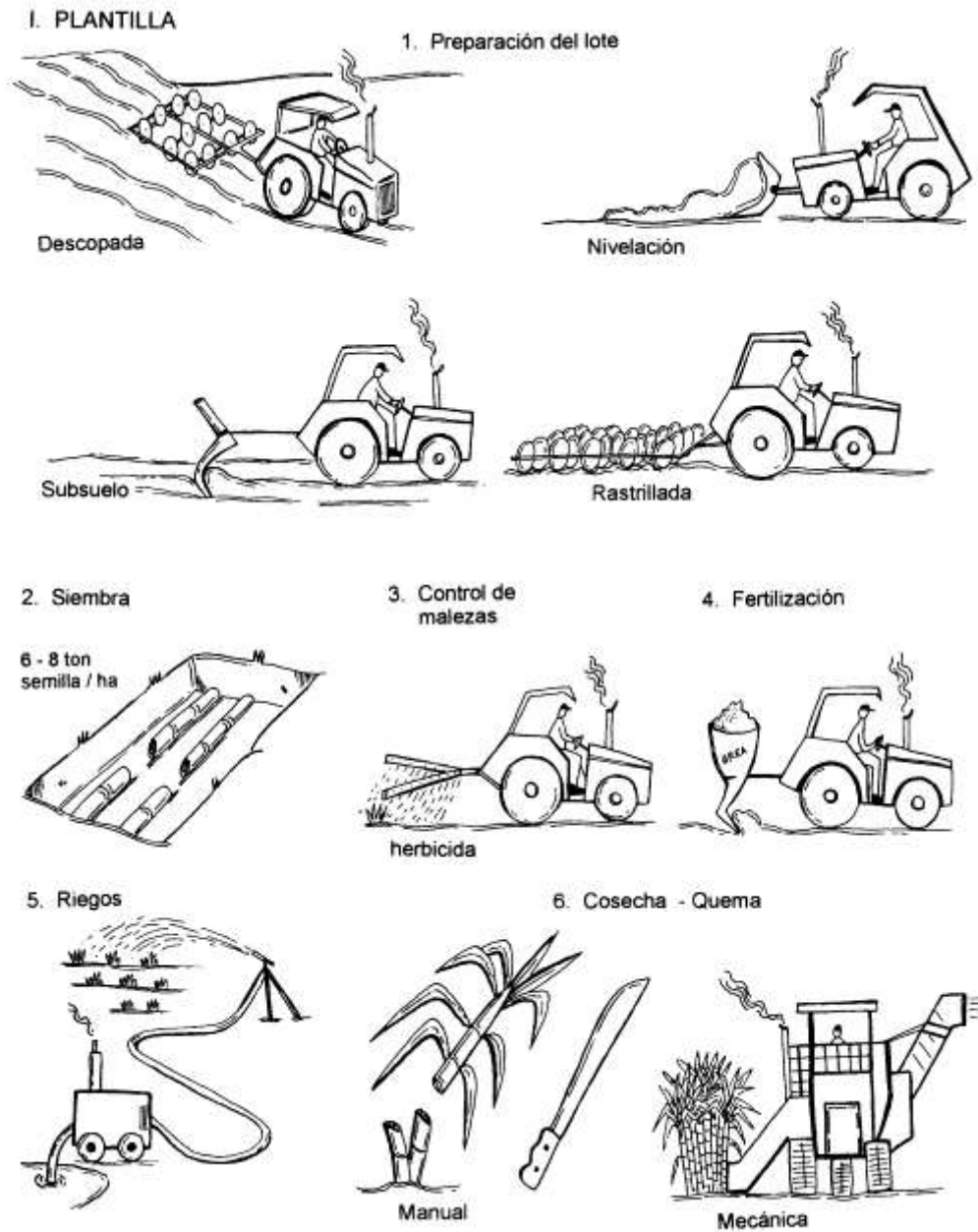


Figura 2. Ciclo de Cultivo de Convencional de la Caña de Azúcar

Fuente: Estudio de Caso Reserva el Hatico (Molina et al., 1998)

A continuación, se describen los componentes claves de la producción de caña de azúcar:

Preparación

Existen dos prácticas de manejo para plantilla y soca. Plantilla se denomina al levante y desarrollo del primer corte de caña de azúcar. Soca se les denomina a los siguientes periodos de crecimiento y corte dentro del mismo cultivo. Así, el estudio considera que el lote se prepara para plantilla, donde el desarrollo inicial es más lento que en socas (Cenicaña 2016).

Descopada

Cuando el lote por primera vez se va a sembrar hay que quitar el forraje existente, para ello se realiza la descopada o descapote donde con un tractor con rastra lo realiza, algunas veces los bulldozers realizan esta labor la cual es totalmente mecanizada (Cenicaña 2016).

Nivelación

Es necesario realizar nivelación mecanizada con bulldozer, cambiando de pendiente el lote y estableciendo los drenajes lo que permitirá cuando se realice el riego la evacuación de las aguas y también para facilitar el uso de compuertas conectadas a los colectores que se abastecen directamente del río Cauca y conducen las aguas a cada uno de los lotes y así realizar el riego ya sea por aspersión, ventanas o simplemente por gravedad. Estas actividades requieren una buena cantidad de energía indirecta además del combustible para los equipos, lo cual se debe considerar dentro del análisis del ciclo de vida del cultivo (Christoforou et al., 2016).

Subsuelo

La compactación del suelo es necesario intervenir para “aflojarlo” y así poder dejarlo en condiciones para siembra. Esta labor también es mecanizada se utiliza tractor con subsolador el cual descompacta el suelo (Cenicaña 2016).

Rastrillada

Ya con el suelo descompactado se procede a rastrillar con tractor y así dejar listos los surcos para siembra.

Siembra

A partir de “trozos” de caña de hasta 1m de largo que se plantan en los surcos a una distancia de 1,5 m entre surco y se realiza el tape de la semilla manual. Se siembra aproximadamente de 6 a 8 toneladas de semilla/hectárea.

Control de Malezas

Cuando se ha realizado la siembra una semana después ya empieza a brotar vegetación que inicialmente existía en el terreno y sus raíces empiezan a crecer o por dispersión de semillas realizada por fauna asociada en el entorno, brotan diferentes tipos de follaje que es llamado “maleza”; que por definición se considera a toda planta que crece fuera de su sitio e invade otro cultivo causando perjuicio. Se realiza fumigación con herbicidas para erradicarla y que no genere competencia a la semilla de caña de azúcar, en absorber los nutrientes del suelo. Este control de malezas según la extensión del lote se realiza de forma manual, mecanizada o químico. En el químico el momento de la aplicación se clasifica en pre emergente (para plantillas) y pos emergente (plantillas y socas).

Los callejones entre lotes cultivados son utilizados para transporte de maquinaria y vehículos, por lo cual también es necesario realizar control de malezas, manejo de drenaje y adecuación con grava, como cualquier vía, para facilitar el tránsito.

Fertilización

A pesar de que los suelos son fértiles para el cultivo de caña de azúcar, es necesario el aporte de nitrógeno el cual se ve en algunos suelos limitados. En plantillas se recomienda una menor cantidad de nitrógeno que en las socas. Generalmente se utiliza urea (46% de Nitrógeno). También se utilizan subproductos como cachaza y vinaza si el nivel de materia orgánica en el suelo es bajo (Marinho, 2014). La aplicación de madurantes es usual para

regular la falta de uniformidad en la maduración. El glifosato (roundup) es el más utilizado (1 a 2,5 lt/ha) (Cenicaña 2016).

Riego

Para el riego se utilizan fuentes superficiales (Ríos, Quebradas) y subterráneas (Pozos), en el caso de estudio se abastece principalmente de río Cauca. Este se realiza por aspersión, ventanas o por gravedad, actualmente los ingenios y proveedores dentro de sus predios han optimizado la conducción de las aguas por tuberías desde la fuente hasta el sitio de entrega ya que consideran el desperdicio y la pérdida gradual en el recorrido. El riego es vital en el proceso de crecimiento de la planta.

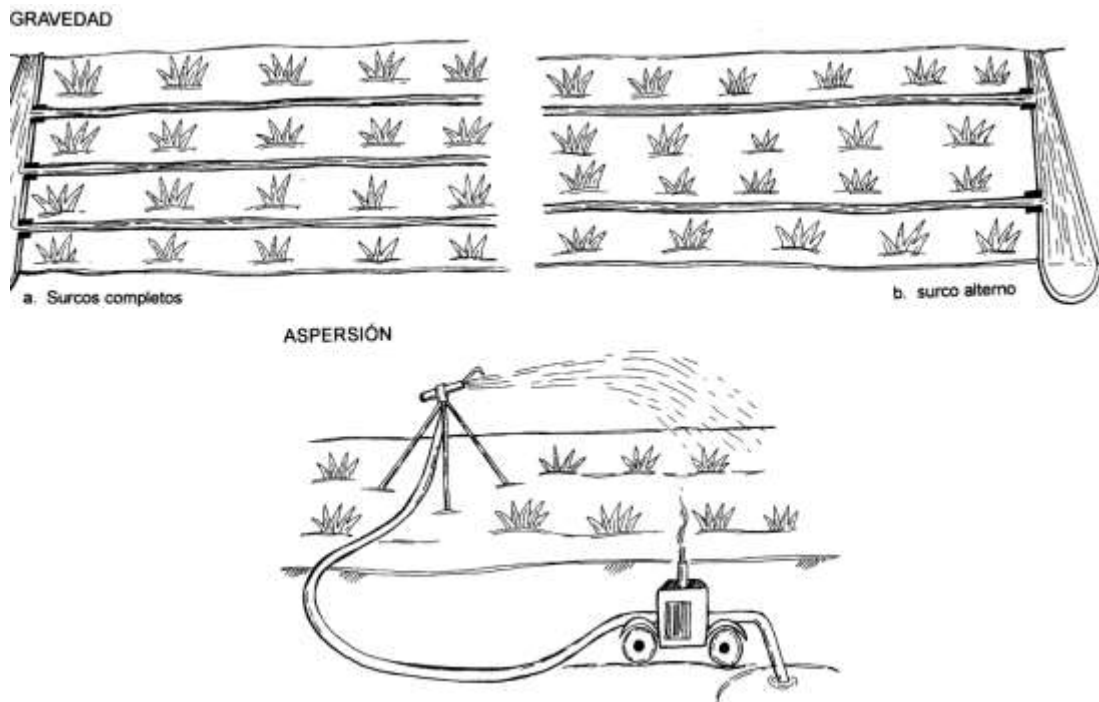


Figura 3. Tipos de Riego en el Cultivo de Caña de azúcar

Fuente: Estudio de Caso Reserva el Hatico (Molina et al. 1998)

El riego por gravedad es el sistema más utilizado, consiste en surcos completos o alternos a los sembrados. La eficiencia que normalmente se alcanza con el riego por surcos alternos

es de 60% a 70%, mientras que con el riego por surco continuo es de 30% a 40% (Cenicaña, 1995).

Cosecha

La edad de corte va ligada con la programación de la molienda en los ingenios pues la sacarosa se mantiene mientras que la caña este en el tallo. Se realiza de forma manual o mecanizada. Si es de forma manual se queman los lotes para eliminar la pelusa y facilitar el corte. Si es mecanizada preferiblemente debe ser en grandes extensiones. A futuro se espera un mayor uso de la cosecha mecanizada debido a las ventajas en cuanto a la reducción de costos y tiempos de cosecha y molienda, y su fácil programación (Cenicaña, 1998).

4.5 Emisiones de gases de efecto invernadero por aplicación de fertilizantes

Uno de los aspectos más relevantes en la evaluación ambiental de procesos agrícolas es el relacionado con la emisión de sustancias contaminantes al aire como resultado de la aplicación de fertilizantes minerales y orgánicos.

Generalmente se aplican compuestos nitrogenados en el cultivo de caña, de los cuales, en los inventarios de gases contaminantes a la atmósfera, se cuantifican las emisiones de gases nitrogenados (NH_3 , NO_x , N_2O) y de CO_2 procedentes de la descomposición de la urea cuando ésta se aplica al suelo, (urea sintética o como parte de la excreta animal gestionada o no gestionada). La enzima ureasa⁴ es quien cataliza la reacción química de la urea en diferentes especies iónicas en función del pH del medio.

⁴ Esta enzima es producida por bacterias, hongos y varias plantas superiores.

4.6 Análisis de Ciclo de Vida

A partir de la década de los 70 la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) se volvió muy popular en el análisis de los efectos del cambio climático en los sectores productivos. Actualmente es utilizada por investigadores y productores agrícolas para determinar impactos medioambientales y así poder mejorar las practicas (Stark et al., 2016).

El ACV también evalúa y cuantifica impactos medioambientales no solo de productos o procesos; es aplicable a cultivos, permitiendo analizar las prácticas agrícolas aplicadas y así evidenciar en este caso el impacto medioambiental de un cultivo de caña de azúcar (Iriarte 2016). El análisis de ciclo de vida se convierte en una herramienta de apoyo en la toma de decisiones dentro de la agroindustria de cultivos como el de la caña de azúcar, que está en expansión, proporcionando información valiosa del cultivo como tal y su interacción con el entorno biótico (Christoforou et al., 2016). El Análisis de Ciclo de Vida es una metodología utilizada para analizar y evaluar impactos en el ciclo de vida completo de un producto o actividad (Garraín et al., 2008).

Según la norma ISO 14040:2006, es una técnica para determinar los aspectos ambientales e impactos potenciales asociados con un producto; anteriormente las categorías de impacto más habituales consideradas en los ACV de procesos o productos eran el efecto invernadero, la disminución de la capa de ozono, el agotamiento de recursos fósiles, la acidificación, la eutrofización, la ecotoxicidad humana y medioambiental, los precursores de ozono troposférico o las emisiones de metales pesados (Garraín et al., 2008), actualmente impactos ambientales como el potencial de calentamiento global y Huella de Carbono son los más populares evaluados por medio de esta metodología (Iriarte, 2016).

“Las Normas ISO 14000 contempla el ACV en su serie 14040; la ISO 14040 elabora un tipo de norma (estableciendo un procedimiento común a todos) que sirva para evaluar los impactos medioambientales a lo largo de toda la vida de un producto” (Iglesias, 2005).

En la Figura 4 se observan las posibles fases de un Análisis de Ciclo de Vida, con entradas, transformación y salidas. Para nuestro caso de estudio evaluaremos desde la cuna a la finca, determinando netamente lo que sucede solo en el cultivo (Stark et al 2016).

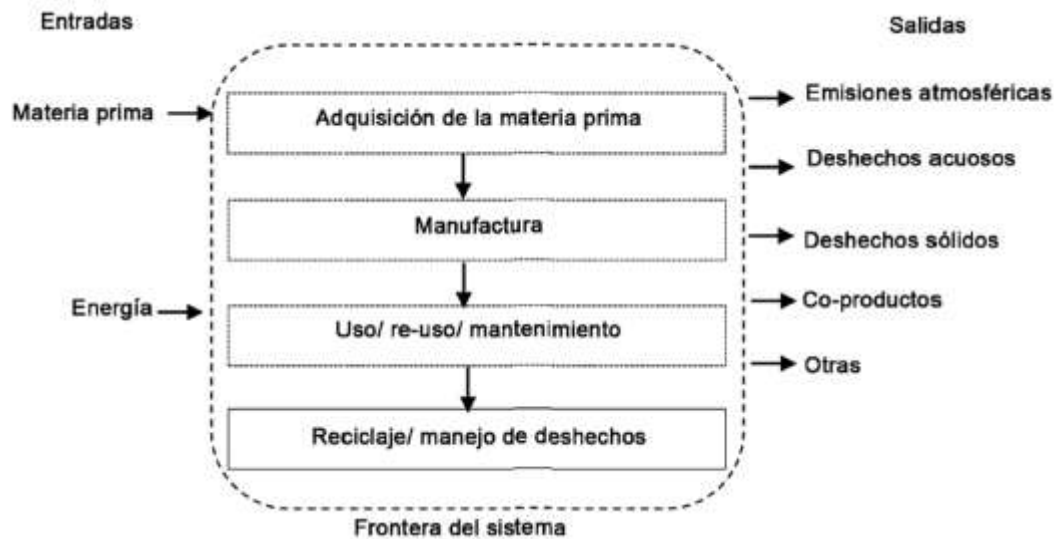


Figura 4. Lógica de aplicación de un ACV (Stark et al., 2016)

Para el caso de estudio el Análisis de Ciclo de Vida descriptivo detalla los flujos que ocurren dentro del sistema que se asocian a la producción de la unidad funcional (UF). Esta última es la que hace posible la comparación de los procesos que tienen que ver con la producción de caña de azúcar.

4.7 Estructura y componentes de un ACV

En la Figura 5, se describe el sistema- producto, que corresponde al ciclo de vida completo según la norma ISO 14040:

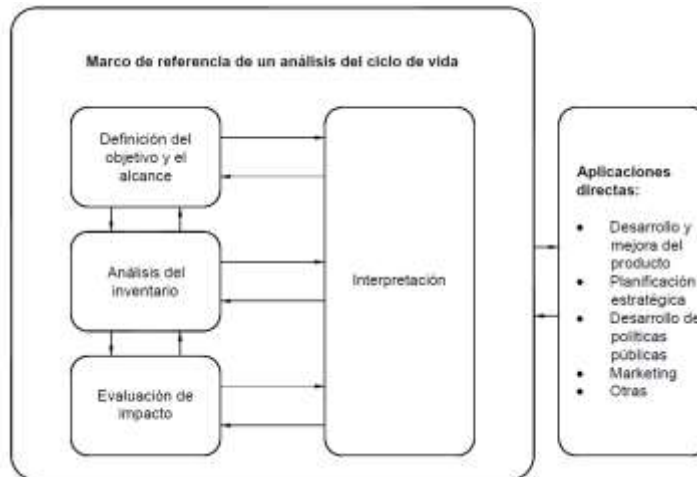


Figura 5. Etapas de un ACV (ICONTEC, 2007)

Dicha norma indica que hay cuatro fases en un estudio de ACV (ICONTEC, 2007):

- a) la fase de definición del objetivo y el alcance,
- b) la fase de análisis del inventario,
- c) la fase de evaluación del impacto medioambiental, y
- d) la fase de interpretación.

Estas fases o etapas son descritas por Stark et al. (2016) de la siguiente forma:

Etapas 1: Se define la frontera del sistema los objetivos a cumplir con el ACV. Se describe el cultivo y hasta dónde va el alcance del estudio para nuestro caso es de la Cuna a la Finca.

Etapas 2: En esta etapa se realiza el inventario, que consta de tres partes:

- Compilación
- Tabulación
- Análisis preliminar de los intercambios con el entorno biótico Consumo de recursos naturales, etc.). Este punto es realmente importante puesto que se realiza una estimación de los impactos medio ambientales que causa en si el cultivo.

Etapas 3. En este paso se estima el impacto del ciclo de vida, a corto, mediano y largo plazo en los cultivos de caña de azúcar que intervienen en el estudio, según las interacciones medioambientales presentadas en el inventario realizado en la etapa 2.

Etapa 4. La etapa final es la interpretación donde se comparan los cultivos y se tiene en cuenta los pasos realizados en el inventario, se definen las clases de impactos medioambientales de la cuna a la finca, a partir de este momento se empiezan a definir propuestas que conlleven a una mejora de las prácticas agrícolas con el fin de mitigar dichos impactos, se tendrán en cuenta los actores involucrados en los que se determinaran propuestas de mejoras solo a nivel de cultivo.

Esta metodología proporciona información valiosa a la empresa que la aplique pues puede ser representada a nivel de costos beneficio, dando herramientas valiosas para determinar la eficiencia y así plantear alternativas que generen ventajas competitivas incrementando ganancias y mejorando su visión medioambiental ante el sector agrícola (Iglesias, 2005).

Existen cuatro formas de abordar los ACV que delimitan el sistema de estudio y facilitan el cumplimiento de objetivos propuestos (Niederl & Narodoslawsky, 2004):

- ACV de la cuna a la puerta (cradle to gate): Estudia únicamente las fases de extracción de materias primas, transporte a fábrica y producción, el estudio se concluye cuando el producto se encuentre preparado para su uso.
- ACV de la cuna a la tumba (cradle to grave): Examina todas las etapas del ciclo de vida del producto desde la obtención de materias primas hasta la gestión de los residuos al finalizar su vida útil.
- ACV de la puerta a la puerta (gate to gate): Inicia cuando las materias primas están listas para entrar en el proceso que culmina con el producto terminado.
- ACV de la cuna a la cuna (cradle to cradle): Analiza todas las fases del ciclo de vida del producto, y además incluye la gestión de los residuos al final de la vida y su reutilización como materia prima que reinicia el ciclo.

Estos enfoques y formas de abordar el análisis de ciclo de vida son esquematizados en la Figura 6.

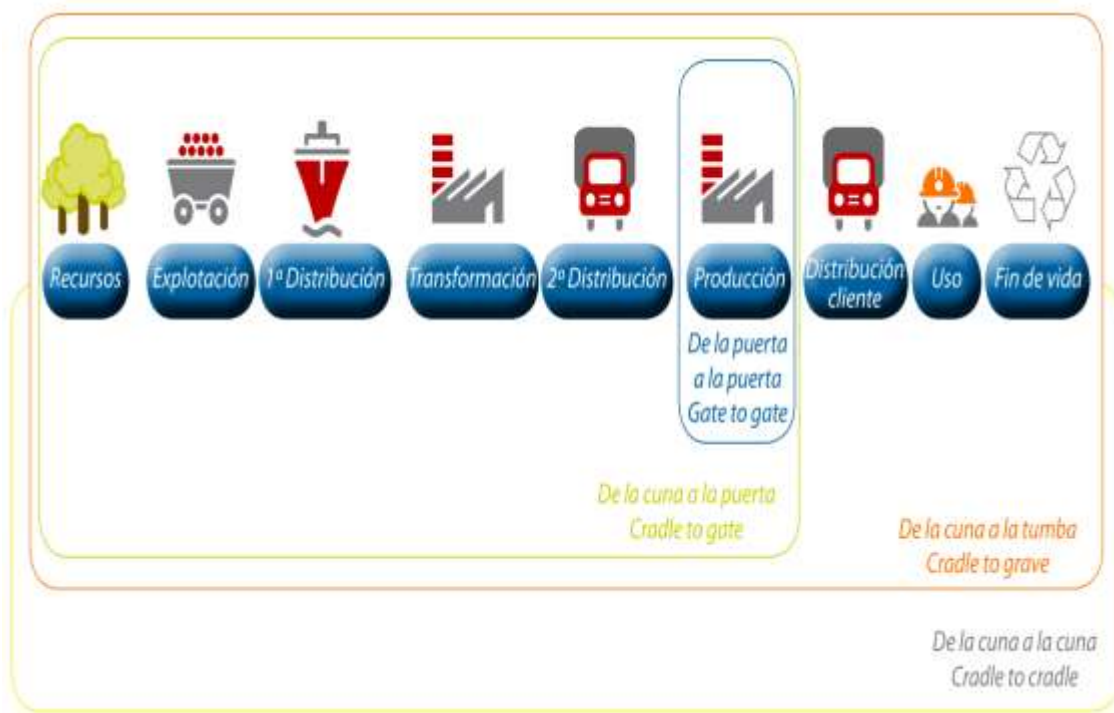


Figura 6. Alcance de un ACV Fuente: Ihobe (2009).

El ACV ha sido desarrollado y aplicado en diversos sectores de la actividad humana, como ejemplos de aplicaciones se tienen las siguientes (Iglesias, 2005)

- Mejoramiento y Desarrollo de productos/servicios (Diseño)
- Comparación de productos
- Identificar “Hot spots” en el ciclo de vida de un producto
- Ecoetiquetado (Tipo I y III)
- Indicadores de desempeño medioambiental
- Localización de la producción
- Planeamiento estratégico
- Educación y comunicación
- Prevenir polución
- Evaluar y reducir riesgos potenciales
- Evaluar y mejorar programas ambientales
- Desarrollo de políticas y regulaciones
- Desarrollar estrategias de mercado

4.8 Métodos para evaluar los impactos ambientales desde un enfoque de ACV

Hay dos formas principales de derivar factores de caracterización: en el punto medio o en el punto final. Los factores de caracterización en el nivel del punto medio se encuentran en algún lugar a lo largo de la ruta del impacto, generalmente en el punto después del cual el mecanismo medioambiental es idéntico para todos los flujos medioambientales asignados a esa categoría de impacto (Goedkoop et al., 2009). Los factores de caracterización a nivel de punto final corresponden a tres áreas de protección; es decir, salud humana, calidad del ecosistema y escasez de recursos. Los dos enfoques son complementarios en el sentido de que la caracterización del punto medio tiene una relación más fuerte con los flujos medioambientales y una incertidumbre relativamente baja, mientras que la caracterización del punto final proporciona mejor información sobre la relevancia ambiental de dichos flujos, pero también es más incierta que los factores de caracterización del punto medio (Hauschild y Huijbregts, 2015).

Goedkoop et al. (2009) desarrollaron un método de evaluación del impacto del ciclo de vida llamado ReCiPe2008 que proporciona factores de caracterización armonizados en los niveles de punto medio y final. Existe una actualización de ReCiPe2008 a ReCiPe2016 la cual proporciona factores de caracterización que son representativos para la escala global, en lugar de la escala europea (versión anterior), al tiempo que mantiene la posibilidad de que varias categorías de impacto implementen factores de caracterización a escala nacional y continental.

El objetivo principal del método ReCiPe⁵ es transformar la larga lista de resultados del inventario del ciclo de vida en un número limitado de puntuaciones de indicadores. Las puntuaciones de estos indicadores expresan el efecto relativo de una categoría de impacto medioambiental. Los indicadores de ReCiPe se agrupan en dos niveles: 18 indicadores de punto medio y 3 indicadores de punto final, donde cada uno constituye un método (de punto medio o de punto final) que contiene factores de acuerdo con las tres perspectivas culturales. Estas perspectivas representan un conjunto de opciones sobre cuestiones como el tiempo o las expectativas de que una gestión adecuada o el desarrollo tecnológico futuro pueden evitar daños futuros.

- **Individualista.** La perspectiva individualista se basa en el interés a corto plazo, con tipos de impacto indiscutibles y un optimismo tecnológico con respecto a la adaptación humana.
- **Jerárquico.** Se basa en el consenso científico en relación con el marco temporal y la plausibilidad de los mecanismos de impacto. A menudo se considera que es el modelo predeterminado.
- **Igualitario.** a largo plazo basado en el principio de precaución. Tiene en cuenta el período de tiempo más largo y todas las vías de impacto para las que hay datos disponibles.

⁵ Según lo enunciado en la web oficial del método, disponible en <https://pre-sustainability.com/articles/recipe/>

Dentro de los métodos para realizar la evaluación de impactos ambientales (Tabla 2), se pueden encontrar algunos basados en uno o varios indicadores, sin embargo, se tiene por consenso que un análisis de ciclo de vida debe incluir una perspectiva amplia para que el análisis pueda tener mayor validez. Algunos métodos son exclusivos para indicadores de punto medio y otros involucran punto final o daño. Actualmente, se observa un uso frecuente del método ReciPe con sus 18 indicadores de punto medio y tres de punto final (Tabla 3 y Figura 7).

Tabla 2. Algunas metodologías para la evaluación del impacto medioambiental usando la metodología de ACV

Nombre	Descripción
IPCC 2007 GWP 100a	Para cálculo de huella de carbono
Ecoindicator	Desarrollado por Pré Consultant (versiones 1995 y 1999). Endpoint. Metodología hoy obsoleta.
CML	Desarrollado por Center of Environmental Science de la Universidad de Leiden, Holanda. Midpoint.
EPD 2008	Metodología para EPS desarrollada por el Swedish Environmental Management Council www.environdec.com
ReciPe	Desarrollado por Pré Consultant en 2009 para “actualizar” Ecoindicator. Existe en versiones Midpoint y endpoint. Actualmente se encuentra la versión ReCiPe2016 v1.1
ILCD	Metodología midpoint desarrollada por el JRC de la CE. Se trata de una selección de categorías de impacto de otros métodos.
Use-Tox	Metodología sobre toxicidades más reconocida por la comunidad científica

En ReciPe cada indicador de punto medio está asociado a una categoría de impacto ambiental y es evaluado a partir de los factores de caracterización de punto medio (CFm) con sus respectivas unidades equivalentes (Tabla 3).

Tabla 3. Descripción general de las categorías de punto medio e indicadores de impacto relacionados en ReCiPe 2016.

Impact category	Indicator	Unit	CFm	Abbr.	Unit
climate change	Infra-red radiative forcing increase	W*yr/m ²	global warming potential	GWP	GWP kg CO ₂ to air
ozone depletion	stratospheric ozone decrease	ppt*yr	ozone depletion potential	ODP	kg CFC-11 to air
ionizing radiation	absorbed dose increase	man*Sv	ionizing radiation potential	IRP	kBq Co-60 to air
fine particulate matter formation	PM _{2.5} population intake increase	kg	particulate matter formation potential	PMFP	kg PM _{2.5} to air
photochemical oxidant formation: ecosystem quality	tropospheric ozone increase (AOT40)	ppb.yr	Photochemical oxidant formation potential: ecosystems	EOFP	kg NOx to air
photochemical oxidant formation: human health	tropospheric ozone population intake increase (M6M)	kg	Photochemical oxidant formation potential: humans	HOFP	kg NOx to air
terrestrial acidification	proton increase in natural soils	yr*m ² *mol/l	terrestrial acidification potential	TAP	kg SO ₂ to air
freshwater eutrophication	phosphorus increase in fresh water	yr*m ³	freshwater eutrophication potential	FEP	kg P to fresh water
marine eutrophication	dissolved inorganic nitrogen increase in marine water	yr.kgO ₂ /kgN	marine eutrophication potential	MEP	kg N to marine water
human toxicity: cancer	risk increase of cancer disease incidence	-	human toxicity potential	HTPc	kg 1,4-DCB to urban air
human toxicity: non-cancer	risk increase of noncancer disease incidence	-	human toxicity potential	HTPnc	kg 1,4-DCB to urban air
terrestrial ecotoxicity	hazardweighted increase in natural soils	yr*m ²	terrestrial ecotoxicity potential	TETP	kg 1,4- DCB to industrial soil
freshwater ecotoxicity	hazardweighted increase in fresh waters	yr*m ³	freshwater ecotoxicity potential	FETP	kg 1,4-DCB to fresh water
marine ecotoxicity	hazardweighted increase in marine water	yr*m ³	marine ecotoxicity potential	METP	kg 1,4-DCB to marine water
land use	occupation and timeintegrated transformation	yr*m ²	agricultural land occupation potential	LOP	m ² *yr annual crop land
water use	increase of water consumed	m ³	water consumption potential	WCP	m ³ water consumed
mineral resource scarcity	ore grade decrease	kg	surplus ore potential	SOP	kg Cu
fossil resource scarcity	upper heating value	MJ	fossil fuel potential	FFP	kg oil

Fuente: ReciPe 2016 (Huijbregts et al. 2017). * Las tablas están en inglés, debido a que sel software de análisis de datos es en este idioma.

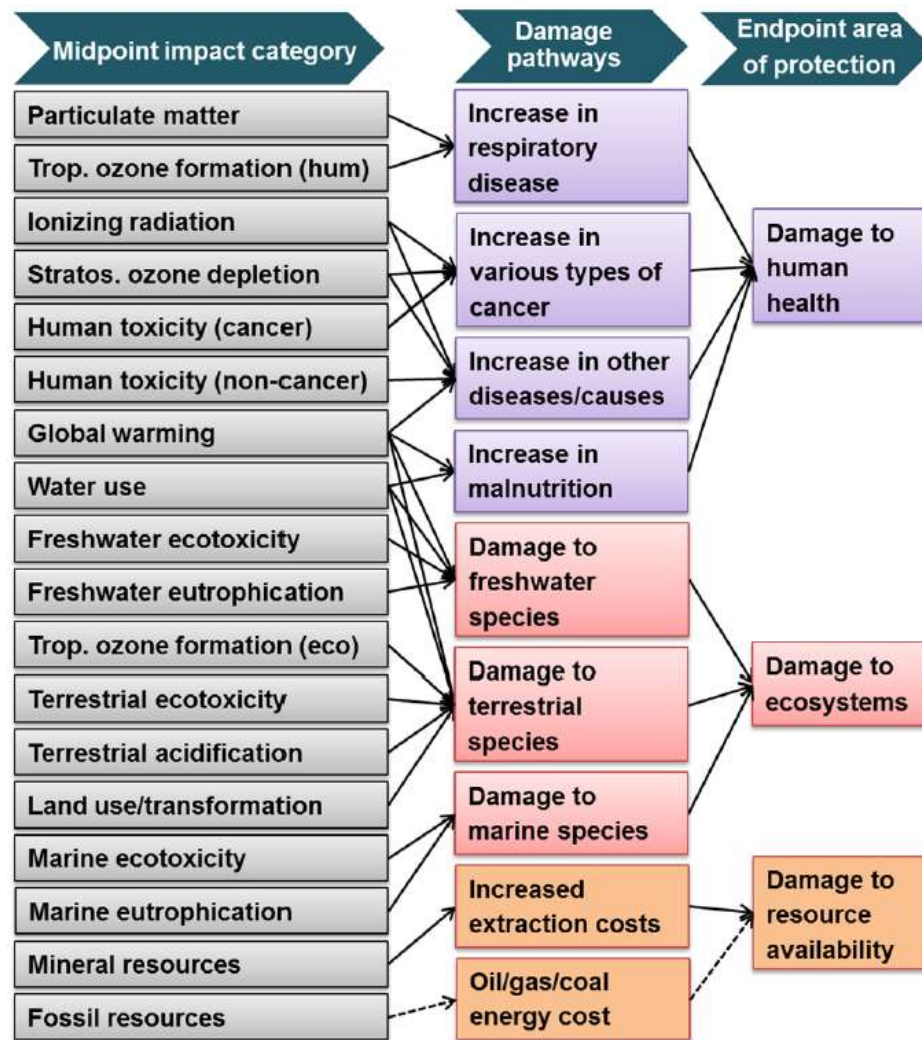


Figura 7. Resumen de las categorías de impacto que se cubren en la Metodología ReCiPe2016 y su relación con las áreas de protección.

Fuente: ReciPe 2016 (Huijbregts et al. 2017)

Dada la complejidad de los cálculos que deben realizarse y la gran cantidad de sustancias involucradas en cada uno de los procesos y materiales empleados durante el ciclo de vida de cualquier sistema del producto analizado, se requiere de software especializado para facilitar dichas operaciones. En el mercado existen diferentes alternativas que pueden ser utilizadas (algunas de uso libre y otras por pago). Algunas de las opciones se describen en la Tabla 4.

Tabla 4. Algunos softwares usados en el análisis de ciclo de vida

Nombre	Descripción	Fuentes
Aire LCA	A través de la metodología de Análisis de Ciclo de Vida, no sólo es posible realizar análisis del comportamiento medioambiental de productos y organizaciones, también es posible centrarse en objetivos específicos, como la mitigación del Cambio Climático a través de la Huella de Carbono, o la reducción de recursos hídricos mediante el análisis de la Huella de Agua.	https://www.solidforest.com/
Aveny LCA 2	Es una solución LCA con todas las funciones con una interfaz de usuario intuitiva un flujo de trabajo elaborado para requisitos mínimos de capacitación.	https://www.aveny-lca.com/
Eco-it	Herramienta software simplificada de Análisis de ciclo de Vida (ACV) y Huella de Carbono (HC) para producto. Esta herramienta software permite simular el comportamiento medioambiental de un producto a lo largo de su Ciclo de Vida y a partir de ello, obtener su Análisis de Ciclo de Vida simplificado basado en la metodología RECIPE, así como su Huella de Carbono basado en valores IPCC de kg eq de CO2.	http://www.ihobe.eus/
GaBi	Es una herramienta para el ACV y contiene todos los elementos necesarios para modelar productos y sistemas. Se pueden construir modelos para cualquier producto, balances de entrada y salida de emisiones, materiales y energía y modificar los parámetros en cualquier momento. Posibilita escenarios de fin de vida. Permite la exportación de los datos.	http://www.gabi-software.com/
Open LCA	Es un software libre, gratuito y multiplataforma para realizar completos análisis de ciclo de vida. Una herramienta que se lleva desarrollando desde 2006, y al ser libre puedes modificar las características para adaptarlo a tus necesidades. Está orientado al ACV pero también se puede realizar la Huella de carbono y del agua. Dispone de una amplia gama de bases de datos.	https://www.openlca.org/
SimaPro	SimaPro es la herramienta profesional para recopilar, analizar y monitorear los datos de desempeño de sustentabilidad de los productos y servicios de su empresa. El software se puede utilizar para una variedad de aplicaciones, como informes de sostenibilidad, huella de carbono y agua, diseño de productos, generación de declaraciones ambientales de productos y determinación de indicadores clave de rendimiento.	https://simapro.com/
UMBERTO	Ofrece datos de gran calidad y resultados transparentes. Refleja el ciclo de vida completo, entradas y salidas, flujos entre procesos, etc. Tiene alta flexibilidad respecto a los límites del sistema. Posibilita también estudiar el ciclo de vida de coste económico. Se puede exportar la información.	https://www.ifu.com/en/

Fuente: Elaborado por el autor a partir de consultas web

4.9 Análisis de incertidumbre

En el análisis de ciclo de vida y cuando se dispone de las herramientas adecuadas, se suele asimilar los flujos inventariados con variables aleatorias que poseen a una distribución estadística de tipo logarítmica. La distribución logarítmica normal es una distribución de probabilidad donde el logaritmo natural de los valores observados se distribuye normalmente y es el modelo de distribución de probabilidad que predominante se utilizada para el análisis de las incertidumbres de los modelos de la base de datos Ecoinvent (Weidema, B., et al, 2013).

5 METODOLOGÍA

5.1 Lugar de Estudio

Para el caso de estudio se abordó información de 3 fincas ubicadas en el valle geográfico del río Cauca en el sector de la Vía a Zarzal – Cartago Norte del Valle del Cauca, con extensión superior a 3000 hectáreas de cultivos aproximadamente; donde 1500 hectáreas son frutales y los 1500 restantes sembradas en caña de azúcar, siendo proveedores principalmente para el Ingenio Riopaila. Se reserva el nombre real de los predios debido a pacto de confidencialidad, ya que los datos suministrados por las fincas son reales y en el gremio no hay disponibilidad de información concreta y detallada de las prácticas agrícolas desarrolladas en los cultivos, ya sea de ingenios o predios de proveedores como es el caso de estudio.

Los lotes pertenecen a tres fincas donde se cultiva caña de azúcar perteneciente al mismo dueño, donde se realizan las mismas prácticas con variaciones de precipitación y suelos. La selección de dichos sitios se basó en criterios como:

- Cantidad de caña por finca (hectárea/lote)
- Datos históricos
- Tamaño de lote

Se cuantificaron los lotes sembrados con caña dentro de las fincas y se obtuvo información sobre los insumos agronómicos, usos de fertilizantes, agua y combustibles, de cada lote para realizar una comparación entre ellos y determinar cuál es el consumo de recursos renovables y no renovables dentro de cada sembradío. Esto permitió obtener información puntual para la elaboración del inventario base para el análisis de ciclo de vida.

5.2 Recolección de Información:

Durante 18 años de experiencia trabajando con cultivos de caña de azúcar, prestando servicio para Ingenios y proveedores en predios ubicados en el valle geográfico del río Cauca; el autor ha observado diferentes métodos y prácticas en preparación de suelos, siembra y cosecha de la gramínea. A pesar de este conocimiento de los predios utilizados en el caso de estudio, se realizó la recolección de información en campo, para mayor veracidad del estudio.

Se empezó con visitas junto al Ingeniero de Campo de estos predios quien facilitó la introducción en el contexto de la operación agrícola que se implementan en los cultivos, y también contribuye a suministrar el histórico de datos a lo largo de 10 años.

Teniendo esta información de base, se empiezan visitas de campo diarias para conocer cada frente de labor agrícola, donde se entrevistó a cada persona que trabaja en el cultivo en cada una de sus etapas (preparación de suelos, siembra y cosecha), incluso se entrevistó a contratistas que realizaban labores con maquinaria tipo bulldozer y retro tipo “Pajarita”.

El tipo de entrevista que se aplicó fue una “no estructurada”, la cual consiste en establecer con el entrevistado una conversación con un tema en común, que, para el caso de este estudio, es el cultivo de la caña de azúcar. Este tipo de entrevista genera confianza al entrevistado lo que nos lleva a obtener mayor veracidad en sus respuestas.

Según la labor que la persona desempeñe en el cultivo, se le pregunta sobre sus funciones en la jornada laboral, teniendo en cuenta las entradas y salidas del sistema productivo estudiado.

5.2.1 Programación de visitas en campo

Estas visitas iban acordes con las actividades desarrolladas en los predios del caso de estudio. Se empezó con la preparación de suelos, como es una finca que produce caña todo el año, tienen rotación de cultivos, lo que llevaba a programar la visita en el predio que estuviera en la etapa que se necesitaba según el avance de la investigación. Si no estaban laborando en ningún lote, la etapa que se necesitaba entrevistar en sitio, se esperaba hasta que estuviera disponible, para no abandonar el rigor en la recolección de los datos. El día de la visita, se llevaba las siguientes preguntas base, para entablar la conversación, según el tipo de labor que se esté desempeñando en campo. Las preguntas cambian según a criterio del investigador (Tabla 5).

Tabla 5: Modelo de preguntas base para entrevista en campo

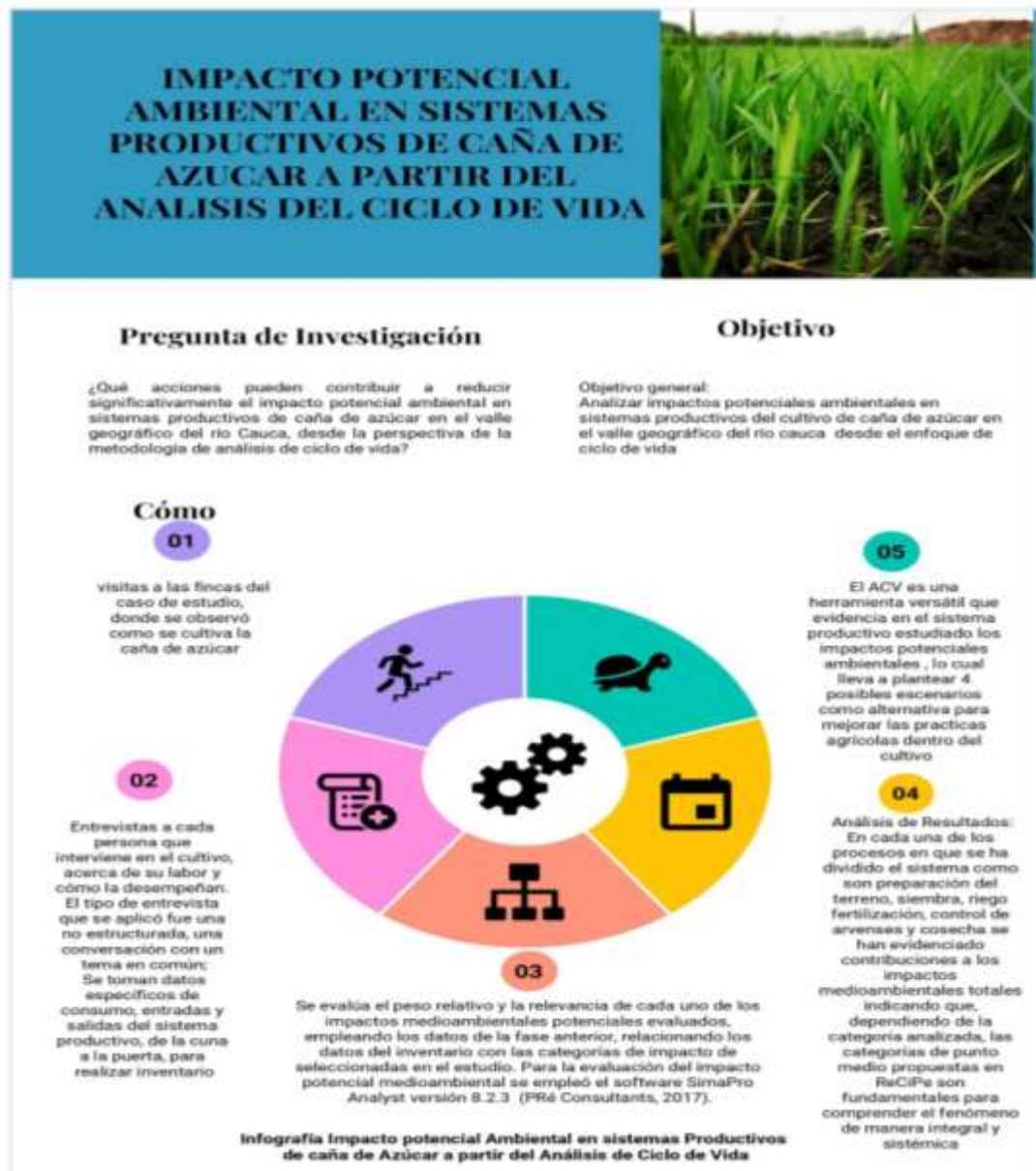
Finca caso de Estudio	
Fecha:	
Entrevistado:	
Labor desempeñada (Aquí también se detalla por cuanto tiempo) ej: preparación suelo	
<ul style="list-style-type: none"> Descripción del trabajo que le compete realizar 	
<ul style="list-style-type: none"> Comportamiento del suelo en la preparación 	
<ul style="list-style-type: none"> Implementos utilizados 	
<ul style="list-style-type: none"> Cuánto gasta de combustible , rendimiento/hora 	

Fuente: Elaboración Propia

La información recolectada en campo es utilizada en la elaboración del inventario, necesario para el procesamiento de los datos, los cuales no corresponden a promedios regionales sino a información directa de las fincas del caso de estudio.

La siguiente infografía presenta las acciones que se llevan a cabo durante el proceso de recolección de datos, inventario, resultados e interpretación (Figura 8).

Figura 8: Infografía Impacto potencial ambiental en sistemas productivos



Fuente: elaboración propia

5.3 Enfoque de Ciclo de Vida

El Análisis de Ciclo de Vida estudia los impactos potenciales a lo largo del cultivo de caña de azúcar; es necesario definir la frontera del caso de estudio, se considera toda la trayectoria del cultivo de caña de Azúcar dentro de la finca (Contreras et al., 2009).

Se tuvo en cuenta la preparación, abono pre, siembra, abono post, control de plagas y cosecha; todo lo que comprende la etapa agrícola del cultivo, cuantificando los efectos medio ambientales potencialmente desfavorables en orden de afectación.

Según esta metodología el Análisis de Ciclo de vida se divide en cuatro fases (ICONTEC, 2017): Objetivos y alcances de Estudio, Análisis de Inventario, Análisis de Impacto e Interpretación. Cada fase se conecta con cada una retroalimentándose entre sí de forma activa.

La investigación realizada cubrió el análisis de ciclo de vida solo para el cultivo, por tal motivo el ACV determina de las prácticas agrícolas, llevados a cabo dentro del cultivo; cual es la de mayor impacto potencial, determinando así cinco pasos principales:

1. Objetivo Final
2. Definición de Unidad Funcional
3. Recolección de Datos sobre las actividades dentro del cultivo de caña tradicional
4. Interpretación de Datos
5. Conclusiones Finales

5.3.1 Fase 1. Definición del objetivo y el alcance del estudio

Siguiendo la metodología definida en la norma NTC ISO 14040, la tipología del ACV del presente estudio se enmarca en un modelo estático, resultado de definir variables como el transporte de insumos, empleado en los distintos recorridos realizados, no se consideran

elementos variables en el tiempo; como es, por ejemplo, la eficiencia del motor del vehículo.

El enfoque definido es atributivo debido a que su modelación está basada en procesos lineales y el objetivo describe los impactos aportados por los diferentes componentes del sistema, excluyendo los efectos generados en la disponibilidad de materiales y las limitaciones o restricciones del mercado, es decir, que la disponibilidad de cualquier producto requerido se considera total (European Commission, 2013). Adicionalmente, se decidió seleccionar el método de asignación cut-off, basado en unidades másicas, con enfoque atributivo (allocation cut-off, by classification System), ya que no se pretende evaluar el impacto de decisiones tomadas fuera del sistema analizado, y el interés, se centra en los impactos directos de cada una de las etapas evaluadas en la delimitación del sistema (Ecoinvent, 2020).

El objetivo definido en el estudio fue cuantificar los impactos potenciales ambientales generados en la producción de la caña de azúcar con base a registros históricos del sector en tres fincas productoras⁶ del valle del río Cauca seleccionadas para este propósito.

Si bien, en la literatura existen distintos estudios relacionados a evaluar los impactos ambientales generados por sistemas productivos, además del cultivo de la caña de azúcar; estos trabajos no son recientes, y son limitados a fuentes de datos indirectas que usan mayormente valores promedios regionales, lo cual puede afectar los resultados y limitar las recomendaciones en sistemas productivos específicos como los estudiados en esta investigación (Saavedra et al., 2000; Mels and Bisschops, 2008; Contreras et al., 2009; USDA, 2009; Mekonnen, 2010; Rosas, 2011; Palliere, 2011, FAO, 2015; IFA, 2015; Durlinger et al., 2017).

⁶ Por consideraciones de confidencialidad de los datos, se ha acordado no publicar los nombres de las fincas que sirven de referencia para el estudio.

Se logra definir que existen partes interesadas en los resultados del estudio, además de la academia, a productores y dueños de las fincas, así como técnicos y extensionistas y agremiaciones (Cenicaña, Asocaña, Técnicaña⁷) que pueden usar los resultados para mejorar la gestión ambiental del sector.

5.3.1.1 Alcance del estudio

De acuerdo con los límites que se han definido en el estudio, se ha definido un estudio “de la cuna a la puerta” (*cradle to gate* en inglés), que incluye el establecimiento del cultivo (Plantilla), la siembra, el riego, la fertilización, el control de arvenses y la cosecha.

5.3.1.2 Función, unidad funcional y flujo de referencia

Como unidad funcional se considera la producción de caña de azúcar que puede ser destinada en su transformación en productos como azúcar y alcohol carburante en los ingenios azucareros. La producción anual definida fue de 5.618,4 toneladas de caña de azúcar en la zona de estudio que corresponde a tres fincas, con 8 suertes analizadas durante un periodo de tiempo de 3 años (Tabla 6).

Tabla 6. Unidad funcional y definición del flujo de referencia

Producto	Función	Unidad Funcional	Rendimiento	Flujo de referencia
Caña de azúcar	Servir de materia prima para la producción de	La producción de 1 tonelada de caña de azúcar	112,4 ton/ha	5.618,4 toneladas

⁷ Fundada en 1977, es la Asociación Colombiana de Técnicos de la Caña de Azúcar. Su sitio web oficial es <https://tecnicana.org/>

5.3.1.3 Definición de los límites del sistema

Como límites del sistema se establecieron los procesos que involucran el establecimiento del cultivo, hasta la cosecha de la caña. Los procesos de transporte al ingenio y su transformación no fueron objeto de este estudio. Siguiendo los pasos propuestos en la metodología del ACV, se definieron los procesos unitarios incluidos en el sistema, resaltando las entradas y salidas entre los límites, y las actividades referentes a la cadena de suministros, lo cual es necesario para la obtención del producto (ICONTEC, 2007). Para dar cumplimiento a lo previsto se tuvieron en cuenta las siguientes operaciones: adquisición de materias primas, entradas y salidas en las diferentes etapas del ciclo de producción de caña, transporte de insumos, producción y utilización de combustibles, uso de electricidad, y uso del agua, principalmente.

5.3.2 Fase 2. Análisis del inventario del ciclo de vida (ICV)

En esta fase se realizó el levantamiento de información en campo y se procedió a consultar los registros de control de insumos de las fincas que permiten establecer las cantidades utilizadas y frecuencias de uso de cada uno de los insumos destinados al proceso productivo de la caña de azúcar. Se detallaron los insumos y procesos caracterizados en los siguientes componentes:

- Siembra. Hectáreas sembradas y tipo de siembra (manual o mecanizada)
- Abonos orgánicos. Potencial uso de abonos orgánicos

- Fertilización mineral. Uso de elementos químicos vitales para el desarrollo del cultivo
- Fertilización química. Uso de fertilizantes complejos y urea.
- Madurantes. Uso de químicos para favorecer la concentración de la sacarosa en la caña.
- Plaguicidas orgánicos. Sustancias requeridas para el control de plagas y enfermedades
- Herbicidas. Sustancias requeridas para el control de arvenses
- Cosecha. Tipo de cosecha realizada (incluyendo la existencia o no de quema) de tipo manual o mecanizada.
- Energía. Uso de combustibles y electricidad en los diferentes procesos desde la siembra a la cosecha de caña
- Riego. Uso de agua por sistema de bombeo o por gravedad

5.3.3 Fase 3. Evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV)

Esta fase tuvo como propósito evaluar el peso relativo y la relevancia de cada uno de los impactos medioambientales potenciales evaluados, empleando los datos de la fase anterior (ICV), relacionando los datos del inventario con las categorías de impacto de seleccionadas en el estudio. Para la evaluación del impacto potencial medioambiental se empleó el software SimaPro Analyst versión 8.2.3⁸ (PRé Consultants, 2017).

⁸ Licencia comercial perteneciente a la Universidad Tecnológica de Pereira.

Después de acopiar la información especificada en la fase de inventario, por medio de datos almacenados por los administradores de la finca, información recopilada en terreno y entrevistas a trabajadores e ingenieros que intervienen en el proceso de cultivo de caña de azúcar dentro de la finca- caso de estudio, se procede a realizar el análisis de la información con énfasis en la afectación de los recursos no renovables y la calidad medioambiental del cultivo en mención (Foteinis et al., 2011).

5.3.3.1 Selección del método de punto medio

De las diferentes metodologías de evaluación de impactos disponibles en el software SimaPro, se ha seleccionado el método ReCiPe, que se define como un método para la evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV), por su rigurosidad y porque ha sido aplicado en otros estudios que sirven de referente, cuyo objetivo principal es convertir la larga lista de resultados del inventario del ciclo de vida en un número limitado de puntajes de indicadores, dividido en dos niveles: punto medio (18 indicadores), punto final (3 indicadores), los cuales expresan la gravedad relativa en cada categoría de impacto medioambiental (Huijbregts, 2017).

5.3.3.2 Modelación del ciclo de vida

Se identificó la calidad de los datos, dependiendo de la base de datos propia y la disponible en Ecoinvent v3.0 database (Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2013), optando siempre por los datos que ofrecieran mayor confiabilidad y certidumbre, aplicando de asignación cut-off, descrito con anterioridad.

Siguiendo las recomendaciones generales para este tipo de estudio, en la selección de los insumos y materias primas presentes en la base de datos, se seleccionaron las materias primas según su mayor afinidad con los insumos usados en el sistema. Cuando fue posible, se adecuaron los flujos de materiales a las condiciones locales en cuanto al tipo de energía

usada y el tipo de combustible empleado en la obtención de las materias primas, buscando una mayor precisión en los análisis realizados.

5.3.3.3 Análisis Monte Carlo

Finalmente, se realizó un análisis de incertidumbre sobre los sistemas generales estudiados (plantilla y soca) usando el muestreo Monte Carlo y mediante la herramienta de análisis de incertidumbre del software SimaPro Analyst, que permitió establecer niveles de confiabilidad en los resultados de los impactos ambientales estudiados.

5.3.4 Fase 4. Interpretación de Ciclo de vida

Una vez calculados los impactos potenciales ambientales y obtenidos los resultados del software SimaPro en la fase anterior, se realizó la interpretación para los resultados más destacados que pudieran contribuir con mejoras del proceso productivo.

Con el análisis de los resultados obtenidos se proponen acciones para continuar con las prácticas agrícolas que se realizan en la finca, caso de estudio implementando mejoras que potencialmente pueden aportar beneficios medioambientales conforme a los resultados obtenidos.

5.3.5 Escenarios de reducción de impactos ambientales

Una vez realizada la evaluación de los impactos ambientales, se procedió a plantear escenarios de reducción de dicho impacto que pudieran ser aplicables en los diferentes sistemas analizados.

Todos los escenarios planteados corresponden a situaciones posibles y realizables según la experiencia como técnico asistente que tiene la autora de este trabajo en dichos sistemas productivos.

Escenario 1: Reducir el uso de maquinaria en la preparación del lote y en sistema plantilla (S-E1)

Para el primer escenario se plantea la posibilidad de reducir en 50% el uso de maquinaria agrícola en el proceso de nivelación en Plantilla, lo cual mejoraría condiciones de compactación del suelo y reduciría la necesidad de aplicar fertilizante. Para usar un escenario conservador se ha planteado que al menos se reduciría un 10% en el uso de urea.

Escenario 2. Cosecha manual en sistema soca (S-E2)

En el segundo escenario se eliminar la cosecha mecanizada y se sustituye por manual, lo que implica un menor uso de maquinaria agrícola en los sistemas y un menor efecto sobre la compactación del suelo, lo que favorecería la aplicación de menor cantidad de urea. Se asume un escenario conservador de reducción de aplicación de urea en 10% con relación al sistema actual.

Escenario 3. Sustituir UREA por Sulfato de amonio en sistema soca (S-E3)

Dado que el aprovechamiento del sulfato esta entre 75 y 90% y el aprovechamiento de la urea entre 40 y 60%, se plantea e este escenario las tasas más bajas de aprovechamiento, es decir, 75% y 40%. Así, por cada kg de urea que se reduzca, se debe aplicar 0,8485 de sulfato de amonio.

Escenario 4. Sustituir UREA por sulfato de amonio en sistema soca (S-E4) con máximo rendimiento

Este escenario se plantea las tasas más altas de aprovechamiento en ambos compuestos, 90% y 60% para sulfato y urea, respectivamente. Así, por cada kg de urea que se reduzca, se debe aplicar 0,676 de sulfato de amonio.

6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Inventario del cultivo de caña

De los datos recolectados en las tres fincas, se pudo determinar los comportamientos promedio que caracterizan el establecimiento y desarrollo del cultivo de caña en la zona de estudio. A continuación, se presenta el resumen de los datos recolectados considerados más relevantes para el análisis de ciclo de vida y que sirvieron como valores de entrada en el software SimaPro.

El rendimiento en el cultivo de la caña en la zona productiva del valle geográfico del río Cauca ha sido superior a los valores promedio de otros países productores y en general se sitúa en promedio superior a las 112 ton/ha, sin embargo, se pueden observar diferencias importantes que evidencian rendimientos inferiores (86,6 ton/ha que pueden afectar el desempeño del cultivo y sus potenciales impactos ambientales) (Tabla 7).

Tabla 7. Rendimiento promedio en las diferentes suertes de las fincas productoras

Finca productora	Suerte	Código del sistema	Rendimiento (ton/ha)
Finca A	1	A1	120,1
Finca A	2	A2	110,3
Finca A	3	A3	133,6
Finca B	1	B1	108,3
Finca B	2	B2	86,6
Finca B	3	B3	106,2
Finca C	1	C1	109,0
Finca C	2	C2	92,4
Finca C	3	C3	119,6
Promedio			112,4

Fuente: elaboración propia

En cuanto a las variedades usadas en las fincas, se conserva la lógica del sector que ha privilegiado una variedad reduciendo la diversidad y potenciando el riesgo de afectaciones fitosanitarias. En la industria azucarera colombiana la variedad CC 85-92 es la más cultivada en la región. Según Cenicaña (2013), a diciembre 31 de 2012, esta ocupaba el 66,4% del área total dedicada a la siembra de caña en el valle geográfico del río Cauca. En la zona de estudio representa el 71,4% contra un 5,7% de la V 71-51 y 3,4% de la CO 421, con un total de área cultivada de 418,1 ha (Tabla 8).

Tabla 8. Rendimiento promedio según las variedades de caña usadas

Variedad	Producción (ton/ha)	Área neta (ha)
CC 85-92	116,1	418,1
CO 421	92,8	19,7
ND	99,1	64,7
RENOVACION	96,2	49,5
V 71-51	98,7	33,6
Total general	112,4	585,5

ND: no definido

Fuente: elaboración propia

En la etapa de plantilla se deben realizar actividades que requieren uso de maquinaria agrícola (tractor y buldócer) como son la nivelación, descepar, rastrilla, pulir y surcar. Cada una de ellas requiere, además, del consumo de combustible diésel (principalmente) según las horas de operación requeridas (Tabla 9).

Tabla 9. Inventario de consumos de combustible (diésel) por uso de maquinaria en plantilla

Maquinaria/proceso	Consumo combustible	Unidades/ha
Nivelación (Bulldócer)	9,9	kg
Descepar (Tractor)	19,5	kg
Rastrilla 1 (Tractor)	19,5	kg
Rastrilla 2 (Tractor)	19,5	kg
Pulir (Tractor)	29,3	kg
Surcar (Tractor)	39,1	kg

Fuente: elaboración propia

Cuando se realiza la etapa de soca, se identifican las actividades que requieren uso de maquinaria agrícola como son despajar, subsolar y escarificar, así como los respectivos consumos de combustible (Tabla 10).

Tabla 10. Inventario de consumos de combustible (diésel) por uso de maquinaria en soca

Proceso	Consumo combustible	Unidades/ha
Despajar (Tractor)	9,8	kg
Subsolar (Tractor)	19,6	kg
Escarificar (Tractor)	19,6	kg

Fuente: elaboración propia

En la fase de siembra se requiere transportar el material de siembra, entre 6 a 8 ton de semilla por ha, equivalente a 16.500 esquejes, adicionalmente, se presenta un abono inicial, generalmente de urea (Tabla 11).

Tabla 11. Inventario de consumos de combustible (diésel) por uso de maquinaria en proceso de siembra manual

Proceso/materiales	Cantidad	Unidades/ha
Material vegetativo para siembra (esquejes*)	16.500	Und
Transporte esquejes en tractor (diésel usado)	19,6	kg
Abono inicial (diésel usado en tractor)	19,6	kg

Fuente: elaboración propia

* Los esquejes o estacas (semilla) se cortan a los 7 meses del cultivo y en algunos países se suela plantar el tallo entero. En este proceso vegetativo, las yemas del esqueje germinan produciendo brotes y raíces que se consolidarán hasta formar la primera generación del cultivo.

El proceso de riego caracterizado es de tipo canal abierto con aplicaciones medias de 1.500 m³/ha (entre 1200 a 1800m³/ha en 13 meses aproximadamente) en un total de siete repeticiones durante el desarrollo del cultivo. Para este proceso, se requieren también bombas para extraer el agua y dirigirla hacia los canales. Se presenta igualmente, en este proceso, el uso de tubería PVC que deben ser reemplazados en cada ciclo productivo.

En cuanto a las estaciones de bombeo, existen compuertas que derivan el agua del río cauca, hacia reservorios y canales abiertos de los cuales por medio de sifones (gravedad) se realiza el riego en los surcos. En total, en una hectárea se utilizan 30 sifones y también se utiliza el riego por tubería de ventanas de 6 metros con 12 tubos de 10"/ha y por gravedad. Las motobombas existentes son utilizadas eventualmente para 2 a 3 riesgos

anuales según el clima. Además, existen dos (2) estaciones de bombeo y también motobombas pequeñas para riego que funcionan con ACPM⁹ (Tabla 12).

Tabla 12. Inventario de materiales y consumo de combustible en proceso de riego

Proceso/materiales	Cantidad	Unidades/ha
Canal abierto (entre 1.200 y 1.800 m ³ /ha) en 7 riegos	1.500	m ³
Bombas para riego (52,1 kg combustible diésel)	52,1	kg
Consumo Energía Bombeo (250 kWh/ha)	250	kwh
Tubos de PVC sustituidos para riego (1,50 m varían de 1" a 3")	3,81	kg

Fuente: elaboración propia

La fertilización es uno de los aspectos más críticos y que pueden afectar el rendimiento y los potenciales impactos medioambientales, siendo caracterizado los principales compuestos químicos utilizados como fertilizantes o madurantes de la caña de azúcar (Tabla 13).

Tabla 13. Inventario de insumos requeridos en proceso de fertilización

Productos usados	Cantidad	Unidades/ha
NPK (triple 15)	50	kg
KCl (Cloruro de potasio)	100	kg
D.A.P (Fosfato diamónico)	100	kg

⁹ Aceite Combustible para Motores, corresponde al Fuel Oil No. 2D y se referencia por las normas ASTM D 975 y NTC 1438. (Fuente: R. CREG- 091-2007; Art. 2)

Productos usados	Cantidad	Unidades/ha
NITRA (abono nitrogenado complejo granulado) (28-4-0-6 (S)) ¹⁰	150	kg
UREA	450	kg
Roundup (Madurante Sal Isopropilamina de Glifosato)	1,2	L

Fuente: elaboración propia

El compuesto NITRA (Grado 28-4-0-6 (S)) fue modelado en el software SimaPro usando como inventario las sustancias nitrato de amonio, amoníaco y sulfato de aluminio tal como se muestra en la Tabla 14.

Tabla 14. Inventario para modelar el compuesto NITRA

Materiales	Cantidad	Unidades
Ammonium nitrate, as 100% (NH ₄)(NO ₃) (NPK 35-0-0), at plant/RER Mass	365,97	kg
Ammonia, as 100% NH ₃ (NPK 82-0-0), at plant/RER Mass	121,95	kg
Phosphate rock (32% P ₂ O ₅ , 50% CaO) (NPK 0-32-0)/RER Mass	125	kg
Ammonium sulphate, as 100% (NH ₄) ₂ SO ₄ (NPK 21-0-0), at plant/RER Mass	247,2	kg
Crushed stone 16/32, open pit mining, production mix, at plant, undried RER S System - Copied from ELCD	139,88	kg

Fuente: elaboración propia a partir de la ficha técnica del producto.

El rápido desarrollo y buen macollamiento de la variedad de caña plantada favorece su capacidad de competir contra las arvenses que son, en términos productivos, causantes de

¹⁰ De acuerdo con la ficha técnica del producto, NITRA es un abono nitrogenado complejo granulado y enriquecido con fósforo y azufre. Los portadores del nitrógeno (NO₃⁻ y NH₄⁺) aseguran un efecto agronómico rápido y sostenido, al igual que el portador sulfatado (SO₄⁼) del azufre.

las disminuciones en las cosechas y en el rendimiento del cultivo. Por lo tanto, es requerido en los cultivos convencionales la aplicación de sustancias químicas que ayuden a controlar la competencia de la caña de azúcar con otras especies vegetales. El uso de herbicidas selectivos como la ametrina (perteneciente al grupo químico de las triazinas) son destinados en preemergencia como en postemergencia para el control de malezas. Por su parte, el diuron se considera un herbicida de amplio espectro y la amina es un herbicida hormonal de baja volatilidad que se aplica en el follaje de las malezas (Tabla 15).

Tabla 15. Inventario de insumos requeridos en proceso de control de arvenses.

Proceso/materiales	Cantidad	Unidades/ha
Ametrina	12	kg
Diuron	10	kg
Amina	4,8	L
Agua de aljibe	400	L

Fuente: elaboración propia

Finalmente, en la etapa de cosecha se han identificado los principales insumos y maquinaria usada en las fincas objeto de estudio, siendo las cosechadoras las que contribuyen en mayor cuantía al consumo de diésel (Tabla 16).

Tabla 16. Inventario de insumos, equipos y consumos de combustible para proceso de cosecha

Proceso/materiales	Cantidad	Unidades/ha
Mecanizada	1	ha
Tractores *	17,5	gl
Cosechadoras (0,5 ha/Hora) **	18	gl
Bombas para Riego	16	gl

Proceso/materiales	Cantidad	Unidades/ha
Aceite tractor***	0,112	gl
Aceite Buldócer	1	g/150 horas de uso
Aceite Cosechadoras	0,00625	gl
Aceite Bombas para riego	0,08	gl
Consumo Energía Bombeo	250	kwh
Cosechadoras (diésel)	58.646	kg

Fuente: elaboración propia

* Para Plantilla (renovación): 6,5 horas/ha; Para Soca: 3,5 horas/ha (consumo promedio de diésel 6gl/hora)

** Consumo Promedio de diésel 9 gl/hora

*** Consumo promedio de aceite 8 gl cada 250 horas trabajadas

6.2 Evaluación del impacto potencial medioambiental

En todas las categorías de impacto potencial medioambiental el análisis muestra que en la finca B y en la suerte 2 (B2 corresponde a plantilla) se presentan los valores más altos por unidad funcional, mientras que los valores más bajos se encontraron en la finca A y correspondiente a la suerte 3 (A3 corresponde a soca) con valores cercanos al 60% del impacto total de B2 (Figura 9). El sistema C2 es el segundo con mayores impactos potenciales medioambientales y se encuentra entre el 70% al 95% del impacto del sistema B2 (Figura 9).

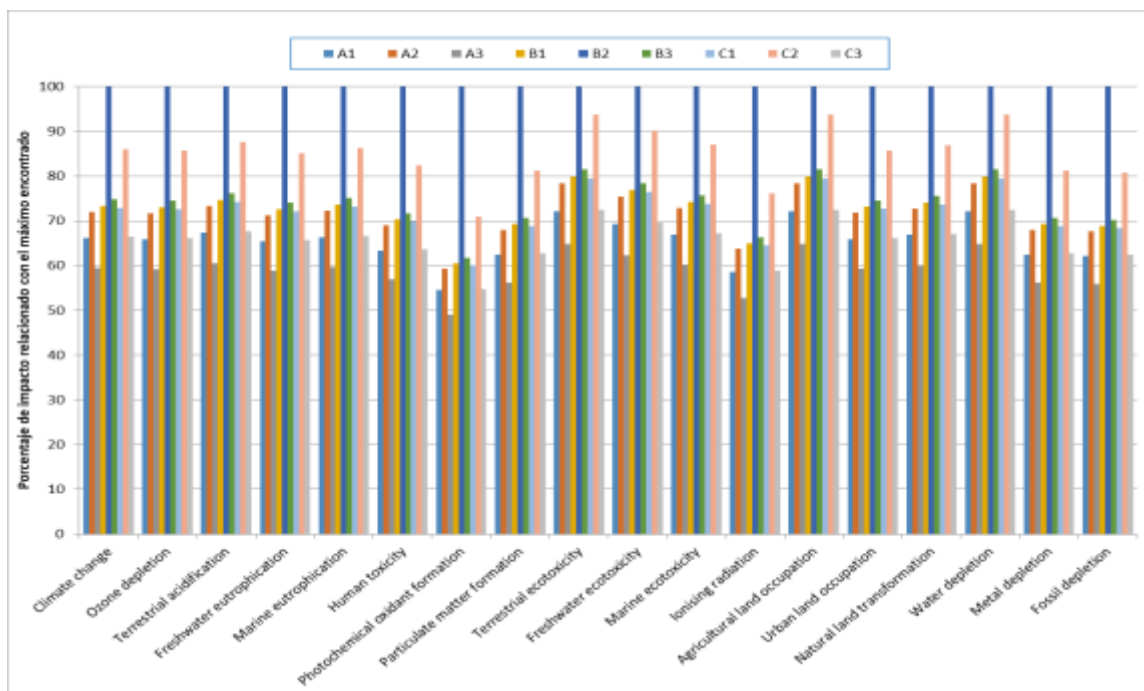


Figura 9. Comparación de los impactos potenciales en punto medio para las diferentes fincas y suertes analizadas

6.2.1 Impactos potenciales de punto medio

En la Tabla 17 se comparan los resultados de las 18 categorías de impacto medioambiental analizadas en los sistemas estudiados, señalando en color verde los de menor valor y en rojo los de mayor. Como referencia de comparación con otros estudios, se puede usar la categoría más estándar y reconocida en cuanto al potencial de calentamiento global (GWP) los valores se encuentran en un rango entre 33,0 y 55,4 kg CO₂ eq./ton de caña producida. Estos resultados corresponden a las emisiones directas e indirectas generadas por el consumo de combustibles y energía, así como las emisiones relacionadas al uso de fertilizantes nitrogenados principalmente.

Los resultados son similares a los sistemas genéricos analizados en SimaPro donde se encuentran valores mínimo y máximo de 37,6 en Sudan y 201,7 kg CO₂ eq./ton en Brasil y es consistente con el resultado para el sistema de producción de caña en Colombia que modela el software con un valor de 45,2 kg CO₂ eq./ton.

Las demás categorías de impacto medioambiental de punto medio son consistentes con los resultados de los sistemas de caña por países modelados por el software SimaPro usando la base de datos Agri-footprint (Anexo 10.6).

En cuanto a la ecotoxicidad terrestre, se destacan los valores potenciales entre 0,33 y 0,51 kg 1,4-DB eq./ton caña producida. Estos resultados son debidos principalmente al uso de sustancias químicas del proceso de control de arvenses que dejan residuos potencialmente peligrosos en el suelo (Tabla 17).

El potencial de eutrofización del agua dulce se encuentra entre 3,38E-03 y 5,75E-03 kg P eq./ton de caña producida, causada principalmente por los procesos de control de arvenses, fertilización y riego. Por su parte el potencial de acidificación terrestre se encuentra entre 0,33 y 0,54 kg SO₂ eq./ton de caña producida y consecuencia principalmente del proceso de fertilización a causa de los compuestos nitrogenados (Tabla 17).

Tabla 17. Impactos potenciales medioambientales por tonelada de caña producida

Categoría de impacto	Unidad	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3
Climate change	kg CO ₂ eq	3,7E+01	4,0E+01	3,3E+01	4,1E+01	5,5E+01	4,1E+01	4,0E+01	4,8E+01	3,7E+01
Ozone depletion	kg CFC-11 eq	6,0E-06	6,5E-06	5,4E-06	6,6E-06	9,1E-06	6,7E-06	6,6E-06	7,8E-06	6,0E-06
Terrestrial acidification	kg SO ₂ eq	3,7E-01	4,0E-01	3,3E-01	4,1E-01	5,4E-01	4,1E-01	4,0E-01	4,8E-01	3,7E-01
Freshwater eutrophication	kg P eq	3,8E-03	4,1E-03	3,4E-03	4,2E-03	5,8E-03	4,3E-03	4,1E-03	4,9E-03	3,8E-03
Marine eutrophication	kg N eq	1,7E-02	1,9E-02	1,5E-02	1,9E-02	2,6E-02	1,9E-02	1,9E-02	2,2E-02	1,7E-02
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	4,1E+00	4,5E+00	3,7E+00	4,6E+00	6,5E+00	4,7E+00	4,6E+00	5,4E+00	4,2E+00
Photochemical oxidant formation	kg NMVOC	1,3E-01	1,4E-01	1,1E-01	1,4E-01	2,3E-01	1,4E-01	1,4E-01	1,6E-01	1,3E-01
Particulate matter formation	kg PM10 eq	8,2E-02	8,9E-02	7,3E-02	9,1E-02	1,3E-01	9,2E-02	9,0E-02	1,1E-01	8,2E-02
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	3,6E-01	4,0E-01	3,3E-01	4,0E-01	5,1E-01	4,1E-01	4,0E-01	4,7E-01	3,7E-01
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	3,4E-01	3,7E-01	3,1E-01	3,8E-01	5,0E-01	3,9E-01	3,8E-01	4,5E-01	3,5E-01
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	1,8E-01	2,0E-01	1,6E-01	2,0E-01	2,7E-01	2,0E-01	2,0E-01	2,4E-01	1,8E-01
Ionising radiation	kBq U235 eq	1,0E+00	1,1E+00	9,0E-01	1,1E+00	1,7E+00	1,1E+00	1,1E+00	1,3E+00	1,0E+00
Agricultural land occupation	m ² a	8,4E+01	9,1E+01	7,5E+01	9,3E+01	1,2E+02	9,5E+01	9,2E+01	1,1E+02	8,4E+01
Urban land occupation	m ² a	1,1E-01	1,2E-01	9,7E-02	1,2E-01	1,6E-01	1,2E-01	1,2E-01	1,4E-01	1,1E-01
Natural land transformation	m ²	1,5E-02	1,6E-02	1,3E-02	1,6E-02	2,2E-02	1,7E-02	1,6E-02	1,9E-02	1,5E-02
Water depletion	m ³	1,3E+01	1,4E+01	1,1E+01	1,4E+01	1,7E+01	1,4E+01	1,4E+01	1,6E+01	1,3E+01
Metal depletion	kg Fe eq	1,3E+00	1,4E+00	1,2E+00	1,4E+00	2,1E+00	1,5E+00	1,4E+00	1,7E+00	1,3E+00
Fossil depletion	kg oil eq	7,0E+00	7,6E+00	6,3E+00	7,8E+00	1,1E+01	7,9E+00	7,7E+00	9,1E+00	7,0E+00

Nota. Las categorías de impacto en la tabla se encuentran en inglés porque el software que se utiliza para el procesamiento de datos así lo reporta en este idioma y además facilita la comparación con estudios internacionales.

6.2.2 Análisis de incertidumbre

Debido a la naturaleza dinámica de la mayoría de los flujos de materia y procesos involucrados en el sistema y su comportamiento como procesos aleatorios, se presenta el resultado del análisis Monte Carlo que crea intervalos de confianza para cada una de las categorías analizadas indicando que la mayor variabilidad e incertidumbre se encuentra en las categorías ocupación del suelo urbano, transformación natural de la tierra y agotamiento del agua. Las demás categorías son relativamente estables y sus resultados confiables. Como ejemplo de los resultados se presenta el sistema B2 (Figura 10).

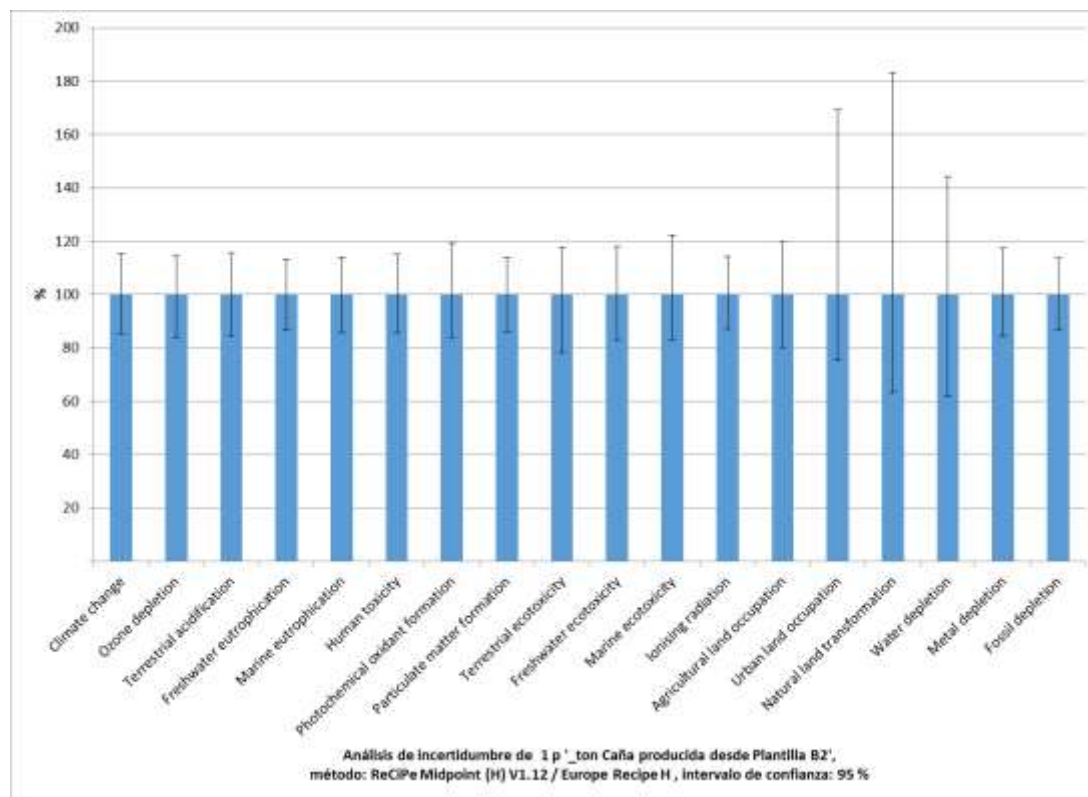


Figura 10. Análisis de incertidumbre mediante el muestreo Monte Carlo para el sistema de producción B2

6.2.3 Árbol de impactos

Tomando como referencia la categoría de impacto potencial de cambio climático (GWP por sus siglas en inglés de amplio uso), el árbol de flujo de contribuciones evidencia que los procesos con mayor impacto potencial medioambiental son la fertilización y la cosecha con diferencias en plantilla y soca. De los diferentes análisis realizados, se muestran los dos sistemas con mayor y menor contribución (sistemas B2 y A3) (Figuras 11 y 12). En estos sistemas, el GWP en plantilla y soca es de 55,0 y 32,7 kg de CO₂ eq. por tonelada de caña producida, respectivamente. En el sistema B2 la mayor contribución a GWP se presenta en la fertilización (63,1%) y preparación del terreno (12,8%) (Figura 11). Aunque

la tendencia se conserva, en la soca se evidencia una contribución mayor para la fertilización (68,7%) y riego con una contribución mayor (8,3%) (Figura 12).

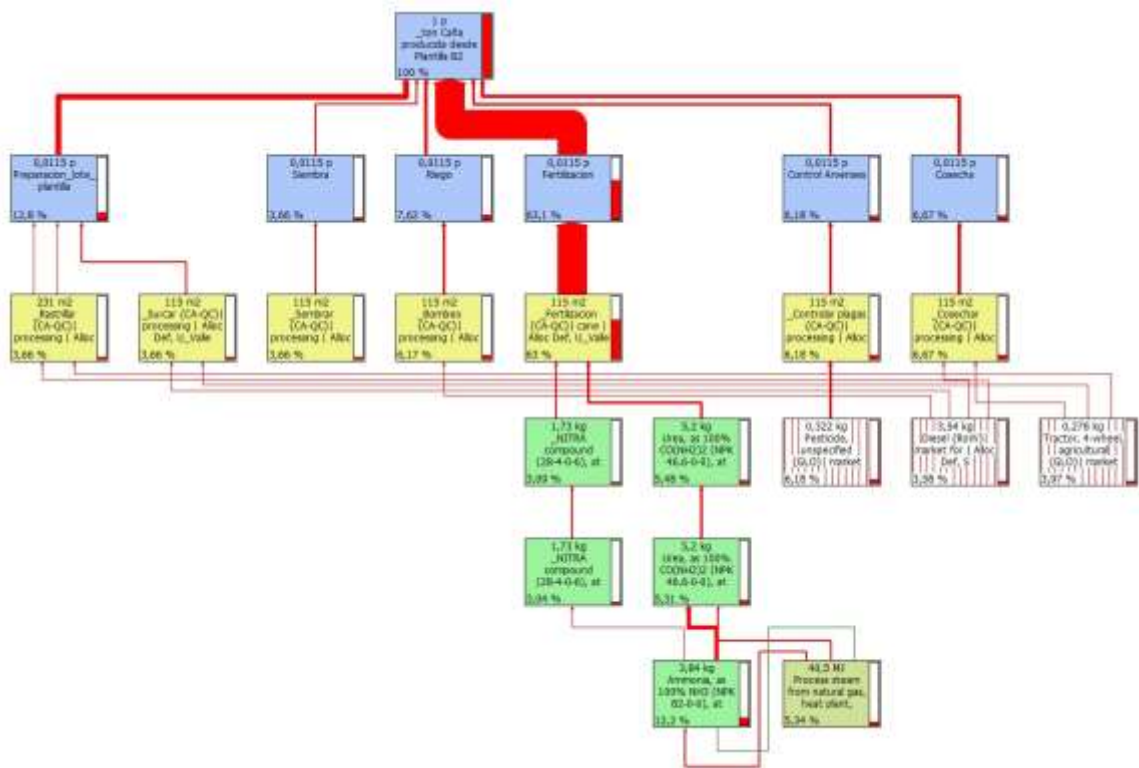


Figura 11. Árbol de contribuciones al potencial de calentamiento global en plantilla B2

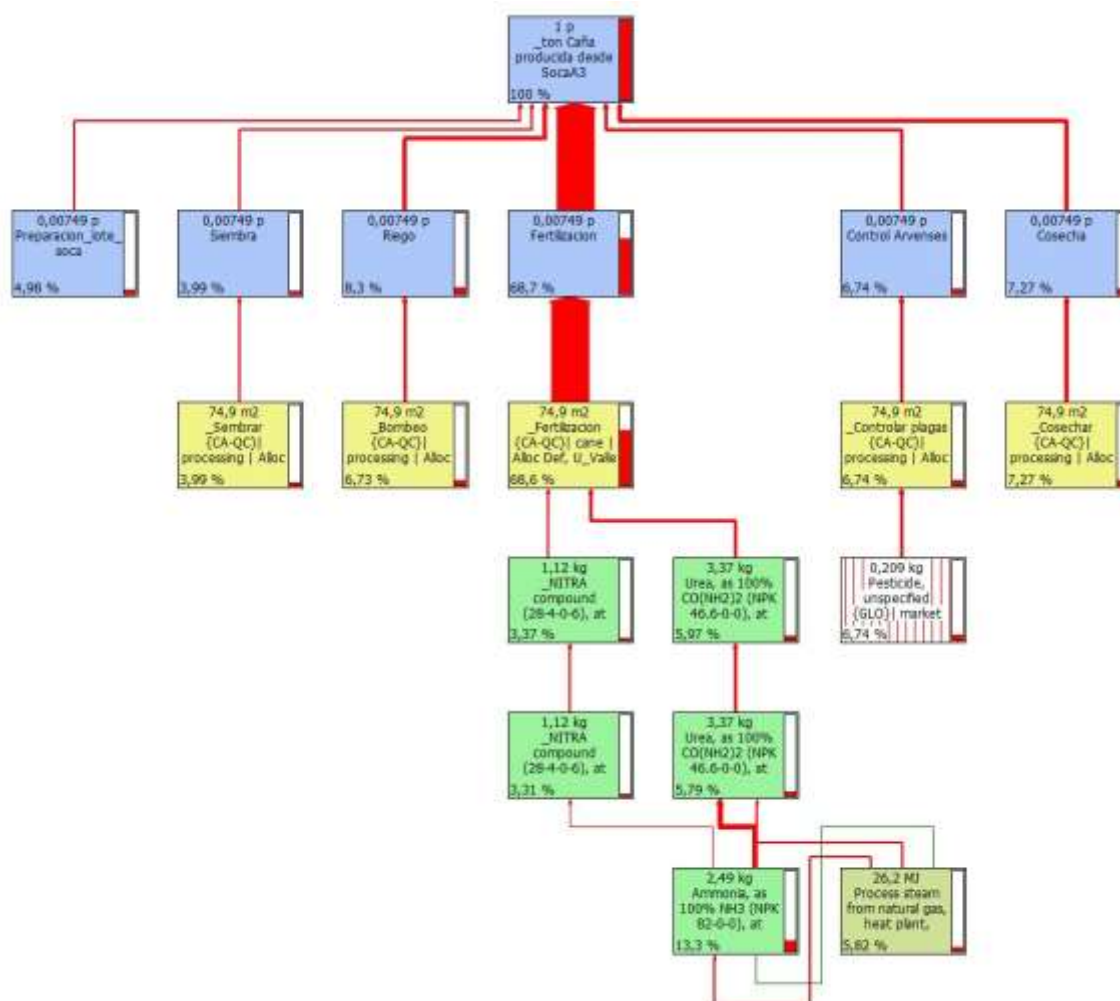


Figura 12. Árbol de contribuciones al potencial de calentamiento global en soca A3

Un análisis ampliado refleja las causas de las contribuciones al potencial de calentamiento global por parte de cada uno de los cuatro subprocesos estudiados. Tomando como referencia esta categoría de impacto medio, se encuentra que, en la preparación del terreno en plantilla los principales procesos son rastrillar, pulir y surca, responsables del 78,4% del GWP (Figura 13). De otro lado, en soca, en los procesos de subsolar y escarificar se concentra el 80% de dicho impacto (Figura 14).

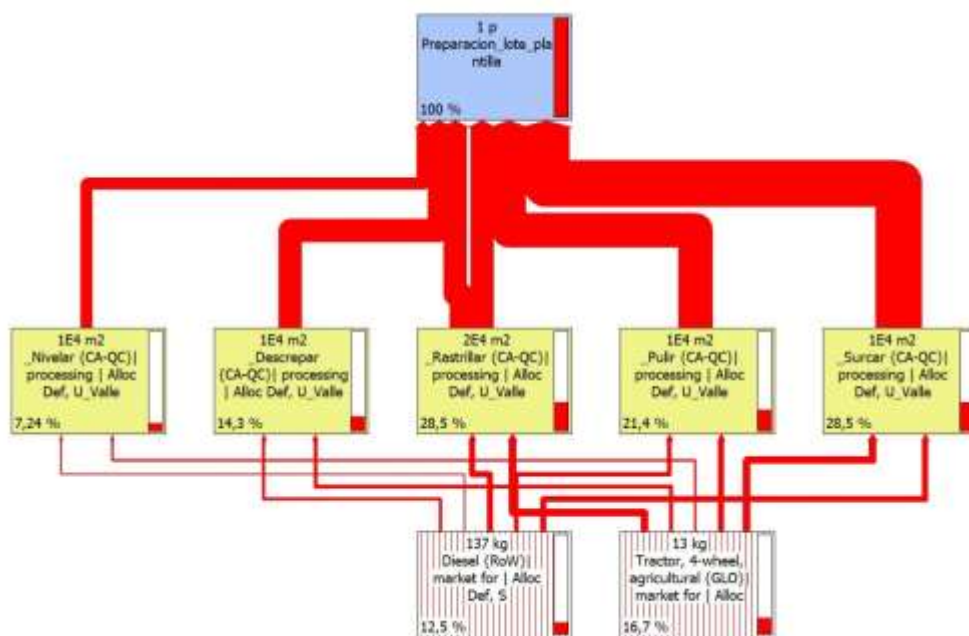


Figura 13. Estructura general de las contribuciones al potencial de calentamiento global por la preparación del lote de una ha de caña en plantilla

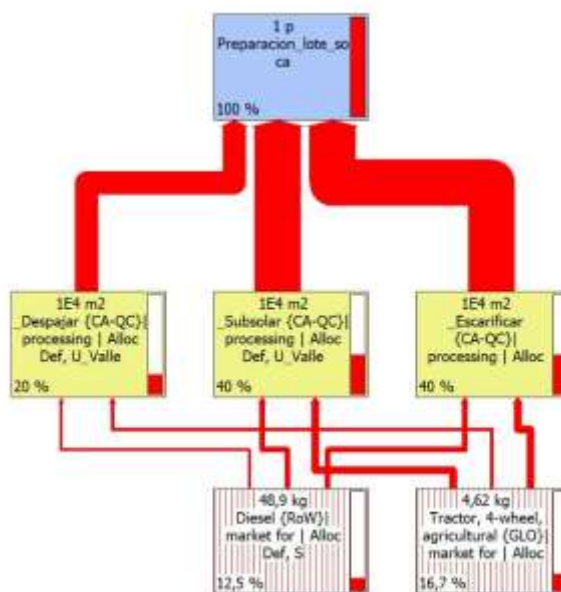


Figura 14. Estructura general de las contribuciones al potencial de calentamiento global por la preparación del lote de una ha de caña en soca

En la siembra tanto los procesos de abono inicial (sin incluir los abonos¹¹) y el transporte de los esquejes contribuyen en igual proporción al proceso (Figura 15).

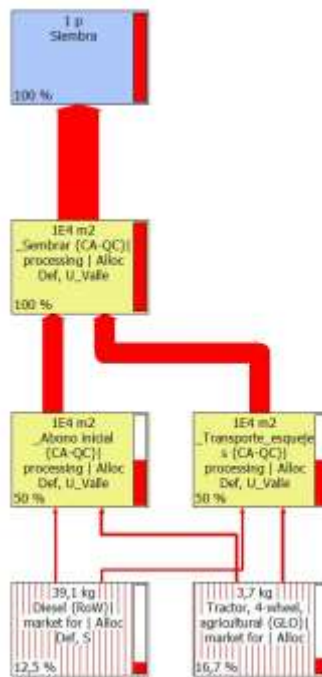


Figura 15. Estructura general de las contribuciones al potencial de calentamiento global por siembra de una ha de caña

En cuanto al control de arvenses las contribuciones están dadas principalmente por la producción de los pesticidas y su transporte (Figura 16).

¹¹ Por facilidad en los cálculos se optó por integrar los fertilizantes en un solo proceso.

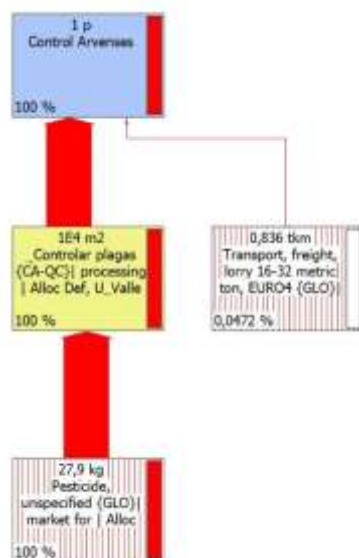


Figura 16. Estructura general de las contribuciones al potencial de calentamiento global por control de arvenses en una ha de caña

Para la fertilización, el 8,6% corresponde a la aplicación de urea y el 6,0% lo aporta el fertilizante nitrogenado (NITRA) (Figura 17).

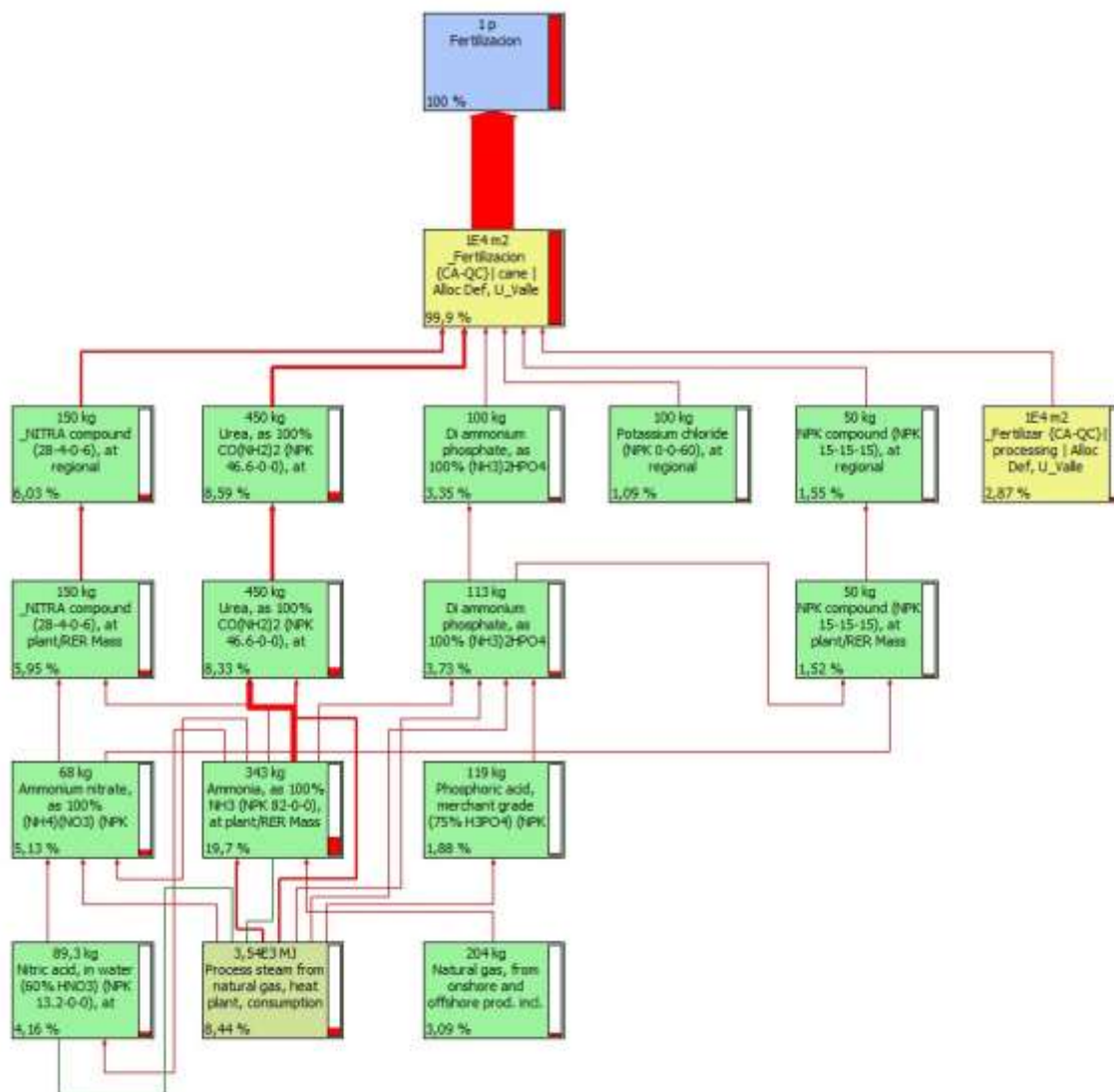


Figura 17. Estructura general de las contribuciones al potencial de calentamiento global por fertilización de una ha de caña

En el proceso de riego la mayor contribución al GWP se da por el uso de la estación de bombeo y el consumo de combustible fósil asociado (Figura 18).

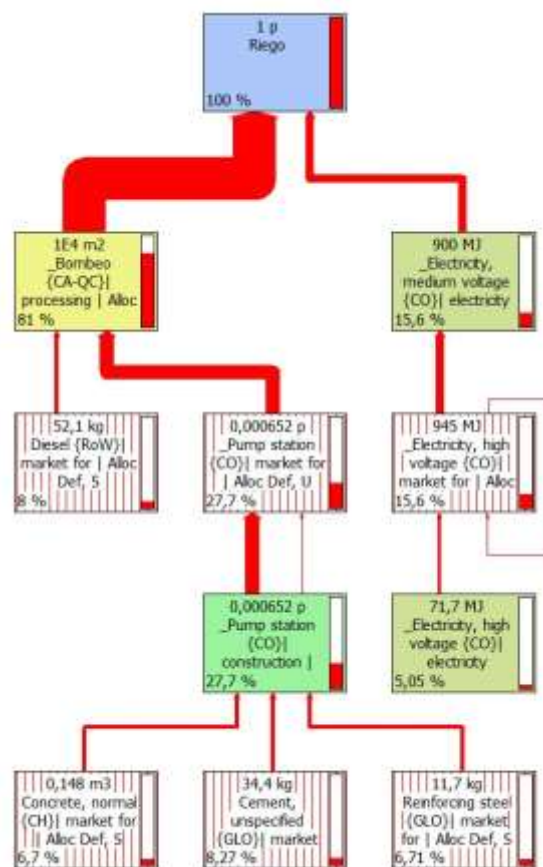


Figura 18. Estructura general de las contribuciones al potencial de calentamiento global por riego de una ha de caña

En el proceso de cosecha, la maquinaria agrícola requerida es la que contribuye con el mayor porcentaje al GWP del sistema (Figura 19).

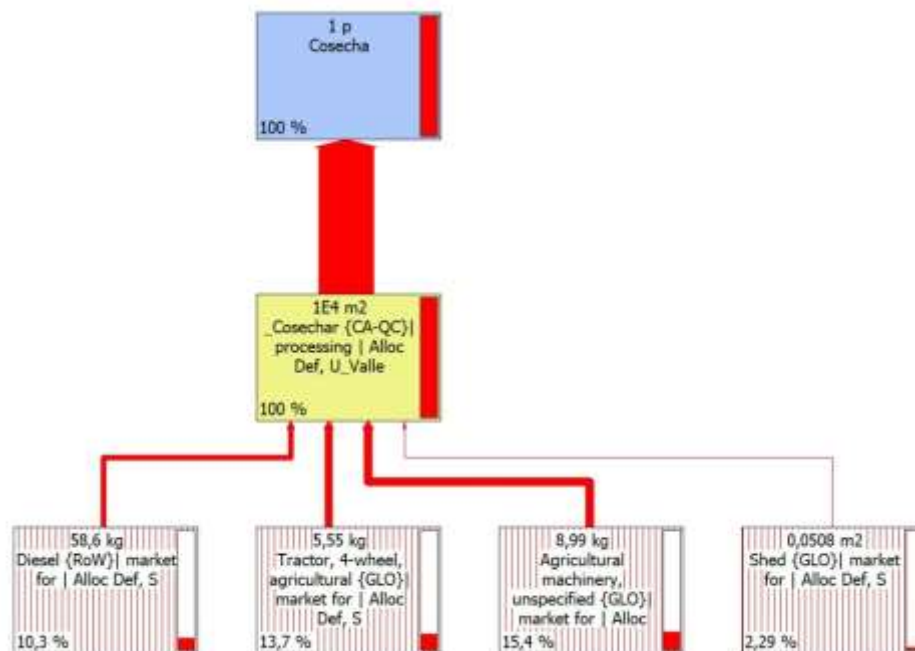


Figura 19. Estructura general de las contribuciones al potencial de calentamiento global por cosecha de una ha de caña

6.3 Interpretación de los principales hallazgos de los resultados de la evaluación medioambiental del inventario de ciclo de vida

En cada una de los procesos en que se ha dividido el sistema como son preparación del terreno, siembra, riego fertilización, control de arvenses y cosecha se han evidenciado contribuciones a los impactos medioambientales totales indicando que, dependiendo de la categoría analizada, las categorías de punto medio propuestas en ReCiPe son fundamentales para comprender el fenómeno de manera integral y sistémica (Figura 20 y Figura 21).

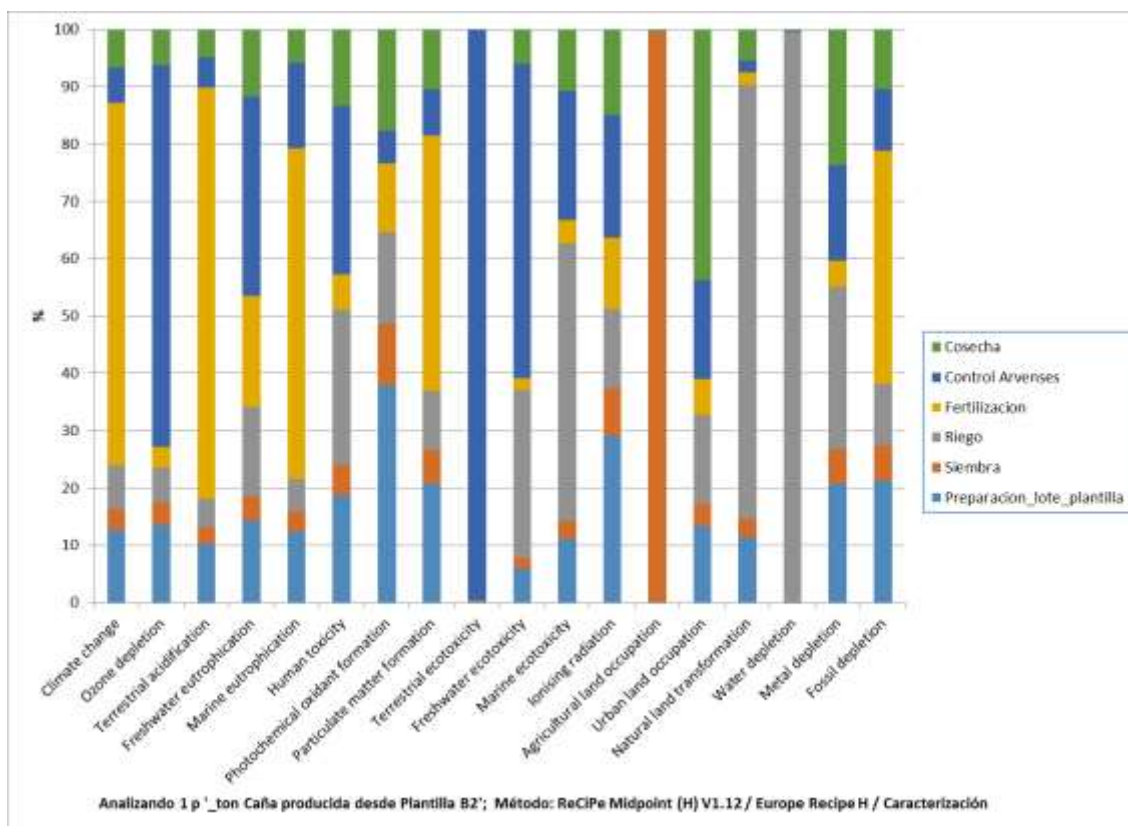


Figura 20. Impactos ambientales de punto medio para el cultivo de caña en sistema B2
(ReCiPe Midpoint (H) V1.12 / Europe Recipe H)

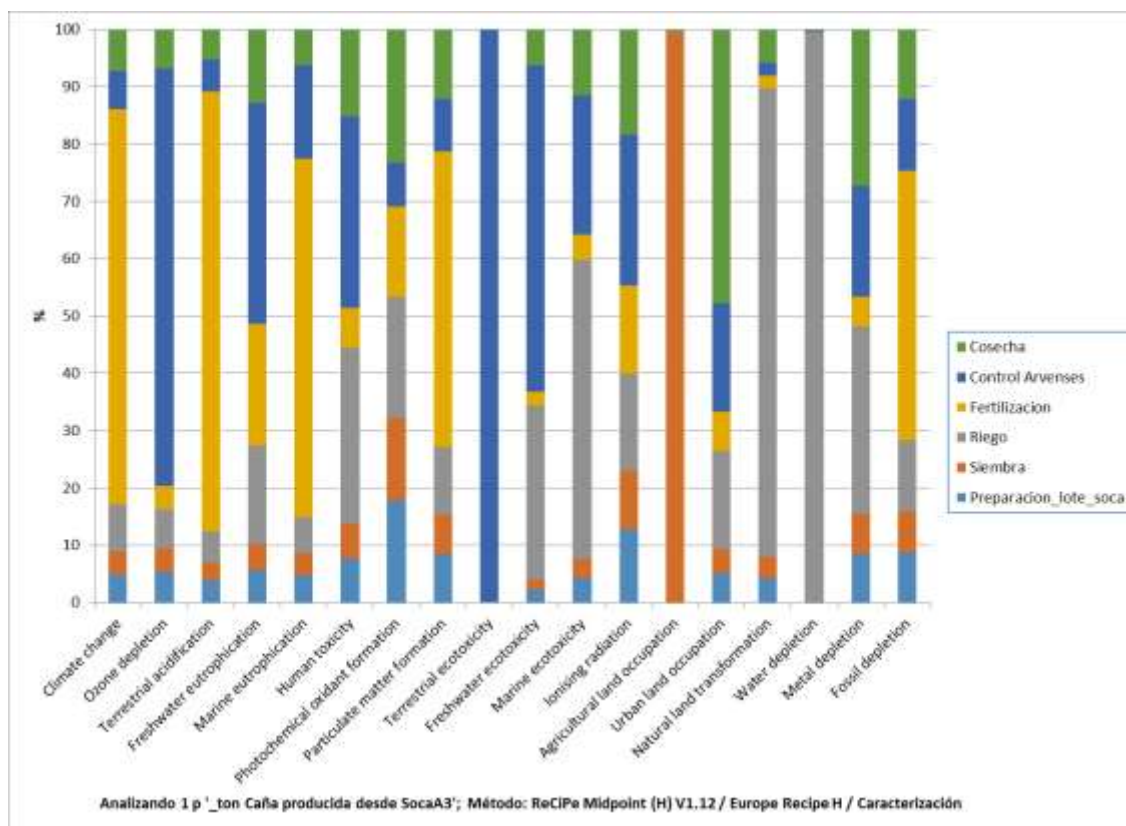


Figura 21. Impactos ambientales de punto medio para el cultivo de caña en sistema A3 (ReCiPe Midpoint (H) V1.12 / Europe Recipe H)

A continuación, se realiza una descripción de los principales aportes a los impactos medioambientales por parte de cada uno de los procesos analizados.

6.3.1 Preparación del lote

El proceso de preparación del lote en plantilla, es responsable de las mayores contribuciones en 2 de las 18 categorías de impacto que son Formación de oxidantes fotoquímicos (POF) (37,9%) y Radiación ionizante (IR) (27,1%). Al analizar este proceso en soca, en ninguna de las categorías sus valores son máximos y se observa por lo tanto la

reducción en cuanto a sus contribuciones al impacto medioambiental total y en las dos categorías de impacto más destacadas (17,9% POF y 18,8% IR).

6.3.1.1 Siembra

En este proceso se destaca la contribución en plantilla y soca a la categoría Ocupación de tierras agrícolas (99,5%).

6.3.1.2 Riego

Este proceso es responsable de 4 de las 18 categorías de impacto medioambiental tanto en plantilla como en soca que son Ecotoxicidad marina, Transformación de tierras naturales, Agotamiento del agua y Agotamiento de metales.

6.3.1.3 Fertilización

Este proceso es responsable de 5 de las 18 categorías de impacto medioambiental tanto en plantilla como en soca que son Cambio climático, Acidificación terrestre, Eutrofización marina, Formación de partículas y Agotamiento de fósiles.

6.3.1.4 Control de arvenses

Este proceso en plantilla es responsable de la mayoría de las categorías de impacto medioambiental con 5 de las 18 que son Agotamiento del ozono, Eutrofización de agua dulce, Toxicidad humana, Ecotoxicidad terrestre, Ecotoxicidad del agua dulce; mientras que en soca además contribuye con los mayores aportes a la Radiación ionizante, además de las anteriores categorías mencionadas.

6.3.1.5 Cosecha

El proceso de cosecha contribuye en plantilla con una categoría de impacto y en soca con dos que son Formación de oxidantes fotoquímicos y Ocupación de suelo urbano.

6.4 Potencial de prácticas de mejora del sistema productivo

Durante 18 años prestando servicio de adecuación de suelos para siembra de caña a Ingenios y proveedores, he observado como la agroindustria de la caña de azúcar tiene gran importancia en la economía del Valle del Cauca. A lo largo de los años en torno a este sistema productivo, no solo se ha generado crecimiento económico; se generó diversidad cultural y étnica, concentrando además asentamientos humanos que dieron origen a caseríos, veredas y corregimientos, entorno a los ingenios; constituyendo la fuente principal de ingresos de dichas comunidades, de la cual mi familia ha sido parte ya que mi padre operaba una maquina alzadora de caña de azúcar, perteneciente al Ingenio Riopaila.

La expansión del cultivo ha crecido de forma gradual y acelerada a lo largo de los años, ocupando suelos incluso con vocación agrícola diferente, generando cada vez mayor impacto potencial ambiental identificado a largo, mediano e incluso corto plazo.

A este nivel las buenas prácticas agrícolas dentro del sistema productivo, no solo promueven la protección medio ambiental, a la par mantiene las buenas características físicas, químicas y biológicas del suelo, que a la final es el soporte donde se desarrolla el cultivo (Bernal, 2010; Cenicaña, 2015a).

Implementar potencialmente dentro de un cultivo un sistema de buenas prácticas agrícolas debería ser el principal aporte técnico por parte de los Ingenios e instituciones como Cenicaña a los proveedores, en pro del beneficio de la agroindustria; ya que los proveedores

en el Valle del Cauca hasta el 2018 abarcaban el 75% de suelo sembrado en caña (Figura 22).

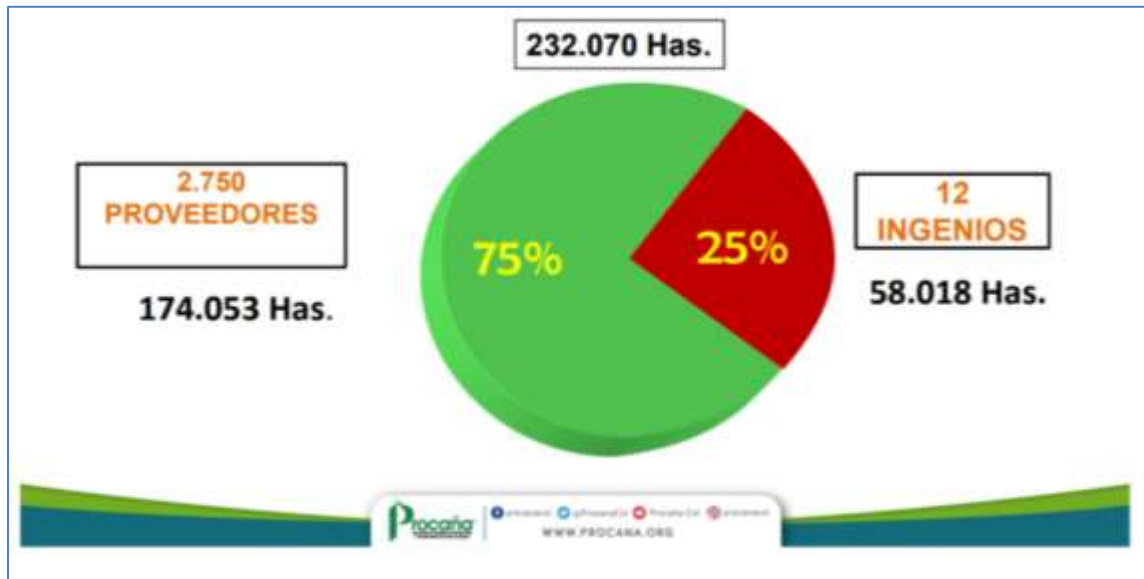


Figura 22. Distribución de la propiedad de la tierra en caña

Fuente: presentación sector agroindustrial de la caña de azúcar 2018 Procaña

Las prácticas agrícolas utilizadas en sus predios son las estandarizadas por el ingenio de quien son proveedores según el tipo de convenio realizado. Como todo negocio la representatividad radica en el tonelaje por hectárea, para lo cual a medida que avanza el convenio realizado el proveedor determina si solo arrienda su suelo, y deja que el ingenio realice todas las prácticas agrícolas o si el proveedor determina las practicas a realizar antes del establecimiento del cultivo, durante y al final.

Debido a que la tenencia de la tierra determina su uso, los proveedores son los dueños del suelo soporte de los cultivos. Es importante plantear que dentro de las fincas con la ayuda del análisis de ciclo de vida se puede establecer un plan de buenas prácticas agrícolas, el

cual será individual según las condiciones de cada predio. El ACV evidencia los potenciales impactos medioambientales y señala dentro del cultivo donde se genera mayor impacto, luego se procede a implementar buenas prácticas según la actividad a realizar que sean acordes con el predio sin dejar de producir la caña de azúcar. Capacitando el personal y estableciendo el control y la rigurosidad en la implementación de herramientas que cambien las prácticas de mayor impacto se establece un modelo perfectamente replicable en diferentes tipos de sistemas productivos.

6.5 Análisis de la modelación de escenarios

De los diferentes escenarios alternativos que se han planteado para la reducción de impactos potenciales ambientales en el cultivo de caña de azúcar en el valle del río Cauca, existen otras posibilidades, que han sido exploradas en otros estudios, como aplicación de gallinaza y vinaza, sin embargo, estas alternativas no son aplicables en los sistemas estudiados porque no corresponden a situaciones posibles y realizables según la experiencia técnica conocida¹² sobre dichos sistemas productivos. Se destaca que en la finca sistema de estudio fue utilizada la vinaza por poco tiempo ya que no vieron resultados en corto plazo, y aunque el Ingenio Riopaila-Castilla regala el subproducto, el proveedor debe transportarla hasta su predio, situación que no es rentable, según afirman los productores, y como principal motivación es que esperaban resultados inmediatos.

Un análisis más detallado permite sustentar la selección de los escenarios soportados en la experiencia de campo y la literatura.

¹² Como ingeniera y asistente técnica, he desarrollado actividad de campo por más de 18 años, lo que ha permitido seleccionar las mejores alternativas soportadas en el conocimiento y la información disponible, tal como lo recomienda el enfoque de ACV y de este estudio en cuanto a calidad de los datos se refiere.

En el primer escenario (S-E1) que plantea la posibilidad de reducir en un 50% el uso de maquinaria agrícola, en el proceso de nivelación para siembra de plantilla se verifica que cuando se va a sembrar se utiliza el bulldozer o tractor de oruga para nivelar y dar pendiente al lote de siembra, lo cual es necesario para un óptimo riego; se deja lista la cabecera y el drenaje, luego se procede a la siembra de la plantilla. Si se reduce a un 50 %, no sería necesario utilizar todo el tiempo bulldozer y el arreglo de los drenajes y la cabecera sería manual después de cada cosecha, por personal dedicado al riego; la pendiente se mantendría cuidando de no perjudicar los lotes durante la cosecha; esto gradualmente mejoraría las condiciones físicas del suelo, disminuyendo compactación. En cuanto a la urea, para usar un escenario conservador se planteó que al menos se reduzca su uso un 10%, en la etapa de fertilización y se empieza a utilizar vinaza en cantidades moderadas, considerando no saturar el suelo para evitar contaminación de aguas subterráneas o contaminación por escorrentía a fuente hídrica. Según investigaciones su uso continuo proporciona a largo plazo muchos nutrientes al suelo, disminuyendo gradualmente costos porque se usaría cada vez menos fertilización química (Urbano et al., 2014).

En el escenario 2 (cosecha manual en soca S-E2) se debe eliminar la cosecha mecanizada y establecer la cosecha manual, implicando un menor uso de maquinaria agrícola y menor impacto en la compactación del suelo. El tipo de suelo franco arcilloso es el que predomina en las fincas del caso de estudio, cuando llueve se satura de agua y se demora bastante en secar; para que la cosechadora pueda hacer su labor de corte se necesita que el suelo este totalmente seco sino lo está no se puede cosechar la caña, generando retrasos en los tiempos de corte, ya que esta máquina en este tipo de suelo “melcochudo”, no puede rodar sobre su oruga pues se atasca, imposibilitando su maniobra.

De igual manera también se favorecería la etapa de fertilización pues al no estar el suelo compactado (Cenicaña, 2015a; SCCS,2001) y la disponibilidad de nutrientes para la planta es mejor y así la aplicación de urea se puede reducir en un 10%

En los escenarios 3 y 4 (S-E3 y S-E4) al sustituir urea por sulfato de amonio, es posible ya que, según la literatura las plantas absorben el Nitrógeno del suelo únicamente en forma de nitrato y amonio, el sulfato de amonio contiene 21% de nitrógeno en forma de amonio y nitrato, se puede utilizar en aplicación directa o con los elementos mayores NPK. El sulfato de amonio facilita la absorción de estos nutrientes fósforo, potasio y azufre, permitiendo el crecimiento de las plantas. por su pH ácido es recomendable para suelos arcillosos, mejorándolos. Era muy utilizado en cultivos, pero gradualmente fue sustituido por la urea. Dado que el aprovechamiento del sulfato está entre 75 y 90% y el aprovechamiento de la urea entre 40 y 60%, se plantea en este escenario las tasas más bajas de aprovechamiento, es decir, 75% y 40%, así por cada kg de urea que se reduzca, se debe aplicar 0,8485 kg de sulfato de amonio, así como las más altas de 90% y 60%, respectivamente, con un factor de 0,676 kg de sulfato de amonio (Peterson, 2004).

Los resultados de la modelación de estos escenarios muestran que en el caso del sistema plantilla, el escenario 1 (S-E1), la reducción del proceso de nivelación y la consecuente reducción de la aplicación de urea por menor compactación y mayor aprovechamiento por parte de la planta, genera un impacto de reducción entre 0 y 3,2% en algunas de las categorías de impacto analizadas (Figura 22). Se destaca principalmente la reducción en las categorías de cambio climático (GWP) y agotamiento fósil, como consecuencia de la reducción del consumo de combustible y de la menor aplicación de urea.

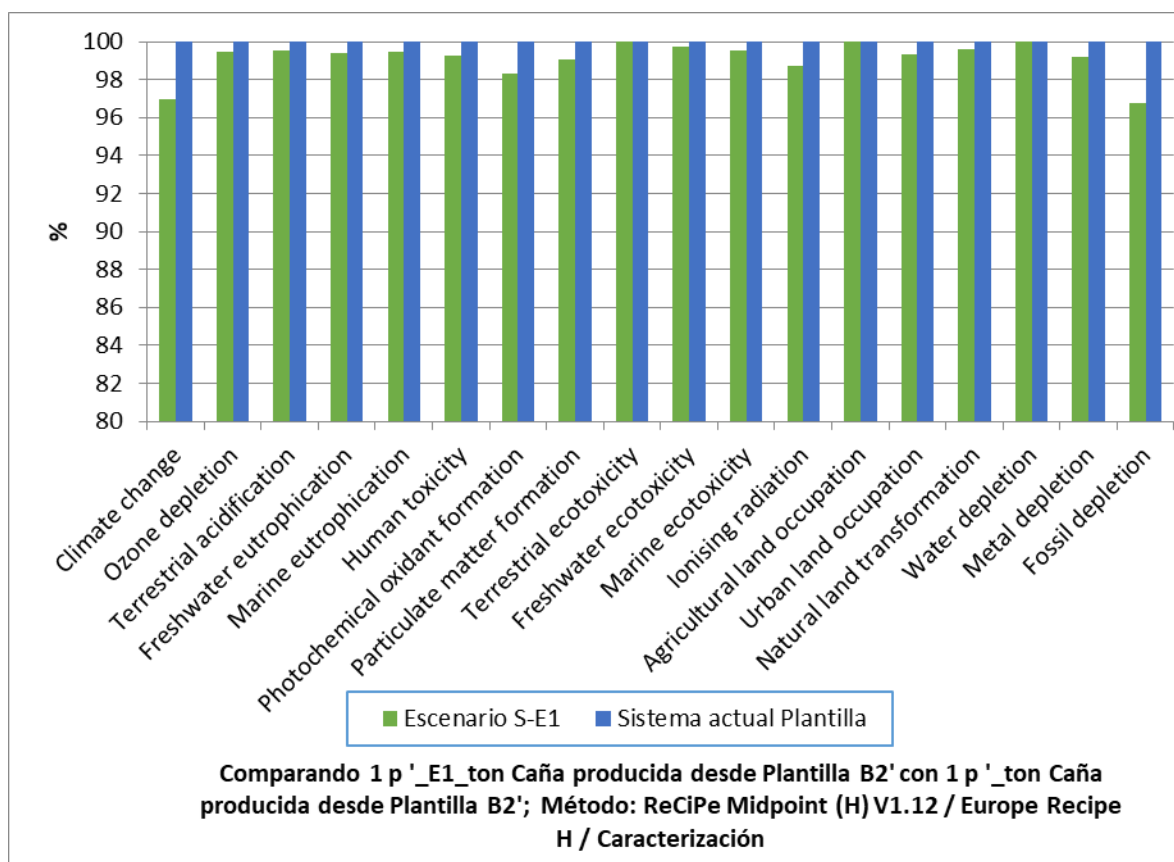


Figura 23. Impactos ambientales del sistema actual plantilla vs el escenario S-E1

En los escenarios desarrollados para el sistema soca se evidencia que el más favorable, desde el punto de vista de los impactos potenciales ambientales, se presenta en el S-E2, al sustituir la cosecha mecánica por la manual, reduciendo considerablemente el uso de maquinaria agrícola y consumiendo menor cantidad de combustible fósil. En S-E2, exceptuando las categorías de agotamiento hídrico, ecotoxicidad terrestre y ocupación de la tierra agrícola, todas las categorías de impacto analizadas presentan reducción importante entre 5,4% y 48% y se obtiene una reducción de 10% en la categoría de cambio climático (GWP) y 15% en agotamiento fósil.

En los escenarios S-E3 y S-E4 se redujo entre 7,7% y 9,0 en la categoría de agotamiento fósil y entre 2,7% y 3,2% en cambio climático, respectivamente. En estos escenarios las demás categorías no mostraron reducciones destacables. Por lo que se puede observar, el uso del sulfato de amonio en lugar de urea podría contribuir a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Sin embargo, este efecto puede no ser suficiente para compensar los costos en los que incurren los productores cuando realizan cambios en sus sistemas productivos.

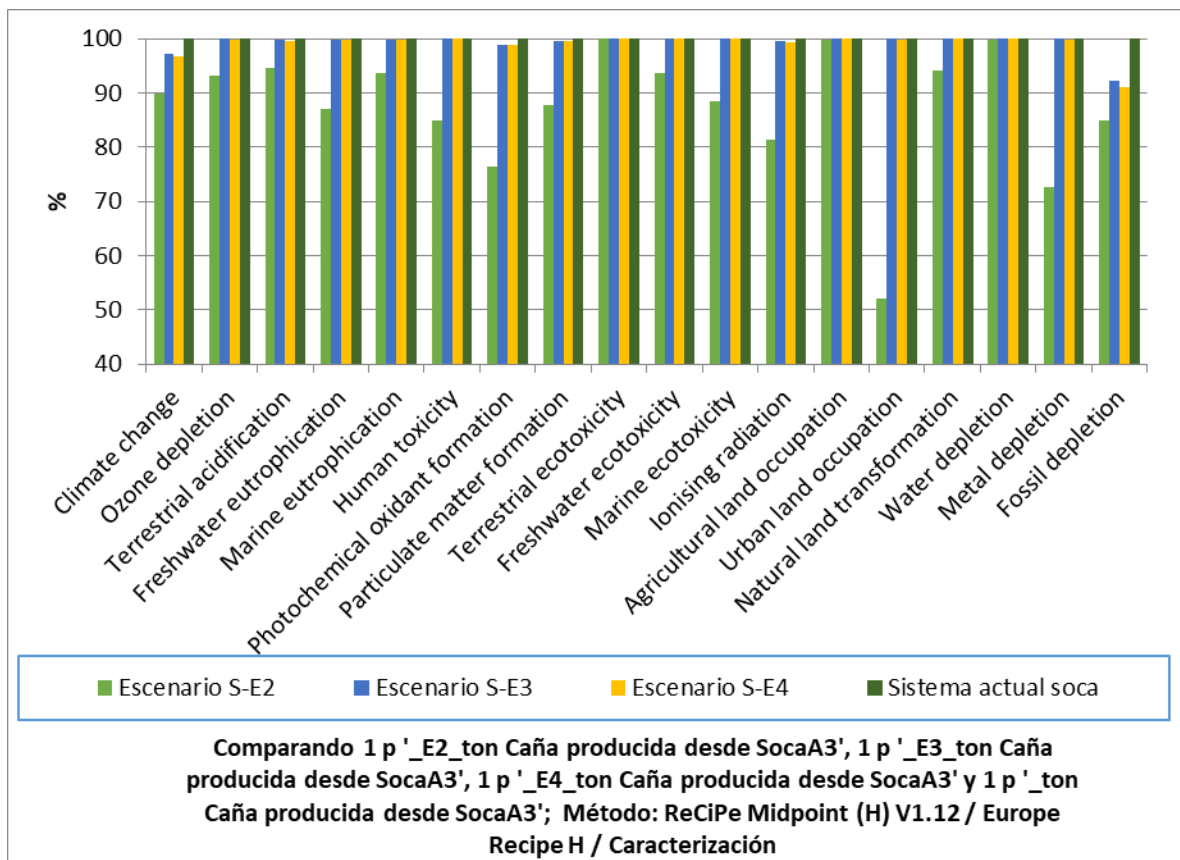


Figura 24. Impactos ambientales del sistema actual soca vs los escenarios S-E2, S-E3 y S-E4

7 CONCLUSIONES

- La metodología de Análisis de Ciclo de Vida es una técnica dinámica que contribuye para mejorar las prácticas agrícolas de los sistemas productivos de caña de azúcar al permitir identificar y comprender mejor los procesos y materiales que pueden estar ocasionando los mayores impactos ambientales. Su uso puede convertirse en una práctica frecuente para la toma de decisiones por parte del gremio de productores que son principalmente los dueños de la tierra sembrada en caña, y que gradualmente conllevaría a mejorar las prácticas agrícolas por menos invasivas y contribuir a mitigar los impactos predominantes dentro de los sistemas productivos.
- El estudio realizado permite conocer aspectos generales y específicos de la producción de caña donde el uso de fertilizantes y abonos, las actividades mecanizadas y el uso de herbicidas determinan los impactos potenciales ambientales sobre el agua el aire y el suelo que son cuantificados mediante la metodología del ACV. Si bien el estudio no desarrolló análisis financieros, se plantea la visión de análisis no solo medio ambiental sino económica, debido a que, si la agroindustria transforma gradualmente sus prácticas a largo plazo, los rendimientos en las áreas cultivadas potencialmente aumentarán y los impactos potenciales medio ambientales disminuirán.
- De los análisis realizados, se encuentra que el proceso de fertilización tanto en plantilla como en soca es responsable de 5 de las 18 categorías de impacto medioambiental tanto en plantilla como en soca contribuyendo a Cambio climático, Acidificación terrestre, Eutrofización marina, Formación de partículas y Agotamiento de fósiles.
- De igual modo, el control de arvenses en plantilla es responsable de la mayoría de las categorías de impacto medioambiental con 5 de las 18 que son Agotamiento del

ozono, Eutrofización de agua dulce, Toxicidad humana, Ecotoxicidad terrestre, Ecotoxicidad del agua dulce; mientras que en soca además contribuye con los mayores aportes a la Radiación ionizante, además de las anteriores categorías de impacto de punto medio mencionadas.

- En la etapa de riego se encontró que el proceso es responsable de 4 de las 18 categorías de impacto medioambiental tanto en plantilla como en soca que son Ecotoxicidad marina, Transformación de tierras naturales, Agotamiento del agua y Agotamiento de metales.
- Con relación al potencial de calentamiento global, se encontró un aporte entre 32,7 y 55,4 kg CO₂ eq./ton de caña producida en soca y plantilla, respectivamente, con variaciones dependiendo de la suerte y del sector de la finca. Las mayores contribuciones para el PCG en plantilla fueron un 63,1% para la etapa de fertilización y 12,8 % para preparación del terreno mientras que en soca 68,7% para fertilización y 7,3% para cosecha. Además, se evidenció que el mayor aporte en este impacto en la fase de fertilización viene dado por las emisiones residuales al ambiente y en cuanto a los químicos usados, se destaca la contribución por el uso de urea.
- De los escenarios analizados se encuentra que la mayor reducción de los impactos ambientales se presenta en el escenario S-E2, al sustituir la cosecha mecánica por la manual, reduciendo considerablemente el uso de maquinaria agrícola y consumiendo menor cantidad de combustible fósil. Evidenciando que, exceptuando las categorías de agotamiento hídrico, ecotoxicidad terrestre y ocupación de la tierra agrícola, todas las categorías de impacto analizadas presentan reducción importante entre 5,4% y 48% y se obtiene una reducción de 10% en la categoría de cambio climático y 15% en agotamiento fósil.

8 RECOMENDACIONES Y POSIBLES ÁMBITOS DE INVESTIGACIÓN FUTURA

Se deben implementar sistemas de gestión ambiental para mejorar las prácticas agrícolas, dentro de los sistemas productivos que trabajen en conjunto con el ACV, lo que puede determinar un trabajo integral, ya que se mejorarían las prácticas agrícolas causantes de generar impactos potenciales medioambientales dentro del cultivo, así como se debe formar y capacitar a todo el personal que interviene en el sistema productivo, sin limitación del área cultivada y número de personas involucradas.

Las instituciones como Cenicaña dedicadas a la investigación y a la mejora de las variedades sembradas, pueden aportar en su área técnica para realizar acompañamiento al proveedor y así en cada caso determinar cómo puede el mismo conservar su suelo, su negocio y disminuir la presión sobre los recursos naturales de los cuales depende, tanto el como toda la comunidad circunvecina.

Siguiendo la recomendación realizada en 2016, por el Director General del IGAC, Juan Antonio Nieto Escalante, donde se enfatizó que Colombia aún no ha dimensionado la urgente necesidad de proteger y hacer un uso adecuado del suelo, se destaca la importancia del suelo y en un sentido amplio la salud del suelo como activo fundamental para el desarrollo agrícola del sector y del país.

Es evidente que el potencial agrícola del territorio del valle geográfico de río , sin embargo, las prácticas actuales generan afectaciones importantes que pueden limitar la capacidad y la calidad del sistema productivo.

Se debería mejorar la apropiación y la adopción de herramientas como el ACV por parte de asistentes técnicos y los productores para analizar con un enfoque integrar los efectos de las decisiones y ajustes del sistema productivo en aras de contribuir con conocimiento para que los sistemas productivos puedan verse además de fuente de desarrollo económico, como contribuyentes del cuidado y respeto hacia el medio ambiente. La academia y las autoridades ambientales deben involucrarse de forma más activa en el acompañamiento que deberían realizarse a estos sistemas productivos, evaluando y recomendando mejoras viables y con soporte en resultados de las investigaciones.

Este tipo de investigación puede ser implementada en otros sistemas productivos y contribuiría a mejorar el conocimiento de los impactos ambientales en otros territorios que también cultivan la gramínea y poder comparar las prácticas en cultivos artesanales de caña de azúcar, para la producción de panela, comparándolas con el cultivo tradicional de caña de azúcar utilizado para producir azúcar y etanol.

9. REFERENCIAS

- Amlinger, F., Favoino, E., Pollak, M., Centemero M. and V. Caimi (2004): Heavy metals and organic compounds from wastes used as organic fertilisers. Study on behalf of the EU Commission DG ENV. A.2
- Asocaña (2020). Aspectos generales del Sector agroindustrial de la caña. Informe anual 2019-2020
- Asocaña (Asociación de Cultivadores de Caña de Azúcar de Colombia). (2002). Guía ambiental para el Subsector Caña de azúcar. Bogotá.
- Bernal, G. (2010). Las buenas prácticas agrícolas (BPA) desde la perspectiva de la microbiología de suelos. In XII Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo. Santo Domingo.
- Cenicaña (1995). El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia. Cassalett, C., Torres, J., Isaacs, C. (eds). Cali, Colombia. 419 p.
- Cenicaña (2013). Remplazar la CC 85-92, un reto para el sector. Carta Informativa. Recuperado el 18 de diciembre de 2020 de https://www.cenicana.org/pdf_privado/carta_informativa/2013_n1/2013_n1.pdf
- Cenicaña. (2015a). Informe Anual Compactación de Suelos
- Cenicaña. (2015b). Preparación de suelos para la producción sostenible de caña de azúcar, guía metodológica.
- Cenicaña. (2016). Conceptos Básicos del suelo y su fertilidad para la nutrición de la caña de azúcar.
- Cenicaña. (1981). Informe anual. Cali, Valle del Cauca, Colombia.
- Christoforou, E., Fokaides, P. A., Koroneos, C. J., & Recchia, L. (2016). Life Cycle Assessment of first generation energy crops in arid isolated island states: The case of Cyprus. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 14, 1-8.
- Congreso de Colombia (2001). Ley 693. Norma sobre el uso de alcoholes carburantes.

- Contreras, A. M., Rosa, E., Perez, M., Van Langenhove, H., & Dewulf, J. (2009). Comparative life cycle assessment of four alternatives for using by-products of cane sugar production. *Journal of Cleaner Production*, 17(8), 772-779.
- Delgadillo-Vargas, O., Garcia-Ruiz, R., & Forero-Álvarez, J. (2016). Fertilising techniques and nutrient balances in the agriculture industrialization transition: The case of sugarcane in the Cauca river valley (Colombia), 1943–2010. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 218, 150-162.
- Durlinger, B., Koukouna, E., Broekema, R., van Paassen, M., & Scholten, J. (2017). *Agri-footprint 3.0*. Gouda: Blonk Consultants.
- Ecoinvent. 2020. “Allocation Cut-off by Classification.” Allocation Cut-off by Classification. Retrieved (<https://www.ecoinvent.org/database/system-models-in-ecoinvent-3/cut-off-system-model/allocation-cut-off-by-classification.html>).
- European Commission. 2013. “Recommendation 2013/179/EU on the Use of Common Methods to Measure and Communicate the Life Cycle Environmental Performance of Products and Organisations.” *Official Journal of European Union* (L 124):210.
- FAO stat crop statics Retrieved;2015
- Foteinis, S., Kouloumpis, V., & Tsoutsos, T. (2011). Life cycle analysis for bioethanol production from sugar beet crops in Greece. *Energy Policy*, 39(9), 4834-4841.
- Goedkoop, M. Heijungs, R. Huijbregts, M. De Schryver, A. Struijs, J. van Zelm, R. (2009). *ReCiPe 2008: A life cycle impact assessment method which comprises harmonized category indicators at the midpoint and the endpoint level*. (1ra ed.)
- González, L. F. (2020). *Análisis de ciclo de vida de la producción de bioetanol de la caña de azúcar. Estudio de Caso: Ingenio Risaralda S.A.* Tesis Doctoral, Universidad Tecnológica de Pereira.

- Hauschild, M. Z., Rosenbaum, R. K., & Olsen, S. (2018). Life cycle assessment. Springer.
- <https://univexfertilizantes.com/Sulfato-de-Amonio-vs-UREA>
- Huijbregts, M. A. J., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M. D. M., ... & Zijp, M. (2017). ReCiPe 2016 v1. 1-A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level: Report I. Characterization (No. RIVM Report 2016-0104a). National Institute for Public Health and the Environment, Bilthoven, The Netherlands.
- ICONTEC (2007). NTC-ISO 14040. Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Principios y marco de referencia.
- Iglesias, D. H. (2005). Relevamiento exploratorio del análisis del ciclo de vida de productos y su aplicación en el sistema agroalimentario. Contribuciones a la Economía.
- Ihobe, Sociedad pública de gestión ambiental. (2009). Análisis de Ciclo de Vida y Huella de Carbono. Dos maneras de medir el impacto ambiental de un producto. España. Edición IHOBE, Sociedad Pública de Gestión Ambiental. Recuperado el 15 de diciembre de 2020 de file:///C:/Users/Usuario%20UTP/Downloads/PUB-2009-033-f-C-001_analisis%20ACV%20y%20huella%20de%20carbonoV2CAST.pdf
- Inga. Mariela Torres, mariela_torresurl@yahoo.com.mx Inga. Karim Paz, kspaz@url.edu.gt Integración: Ing. Federico G. Salazar, correo@fsalazar.bizland.com, Método de Recolección de datos para una Investigación; Universidad Rafael Landívar, Facultad de Ingeniería.
- International Fertilizer Association (IFA). (2015). Statistical information about fertilizers. Disponible en <https://www.fertilizer.org/>
- Marinho, J. F. U., Correia, J. E., de Castro Marcato, A. C., Pedro-Escher, J., & Fontanetti, C. S. (2014). Sugar cane vinasse in water bodies: Impact assessed by liver histopathology in tilapia. Ecotoxicology and environmental safety, 110, 239-245.

- Melissa Roja Downin; Compactación de suelo y producción de caña de azúcar; 2011
- Molina, E., Molina, C. H., Molina, D. H., & Molina, D. P. (1998). Estudio de Caso Sobre el Manejo Convencional y Agroecológico del Cultivo De la Caña de Azúcar en el Valle del Cauca.
- Moya, C., Domínguez, R., Van Langenhove, H., Herrero, S., Gil, P., Ledón, C., & Dewulf, J. (2013). Exergetic analysis in cane sugar production in combination with Life Cycle Assessment. *Journal of Cleaner Production*, 59, 43-50.
- Niederl, A. Narodoslawsky, M. (2004). Life cycle assessment – study of biodiesel from tallow and used vegetable oil. *Institute of efficient resources and sustainable systems*, 721-739.
- Petersen, J., Hansen, B., Sørensen, P. (2004). Nitrificación de N sulfato de Amonio, y recuperación de cultivos de N- nitratos de amonios marcados inyectados en bandas.
- Saavedra, J. F., & Vargas, O. R. (2000). Estimación del impacto ambiental del cultivo de caña de azúcar utilizando la metodología del análisis del ciclo de vida (acv). *Revista de Ingeniería*, (12), 61-67.
- Stark, F., Moulin, C. H., Cangiano, C., Vigne, M., Vayssières, J., & González-García, E. (2016). Metodologías para la evaluación de sistemas agropecuarios. Parte I. Generalidades. Análisis del ciclo de vida (ACV) y de las redes ecológicas (ENA). *Pastos y Forrajes*, 39(1), 3-13.
- Weidema, B., et al. Overview and methodology. Data quality guideline for the ecoinvent database version 3. *Ecoinvent report nº1 (v3)*, St. Gallen, 2013.
- Zinck, J. A., & Farshad, A. (1995). Issues of sustainability and sustainable land management. *Canadian Journal of Soil Science*, 75, 407-412.

10. ANEXOS

10.1 Datos producción de caña

Finc a	SUERT E	AREA NETA ha	EDAD (Meses)	# CORTE DE CEPA ACT	VARIEDAD	TNL CAÑA	TCH *	TCHM **
C	1	19.71	11.5	17	CC 85-92	2,454	124	10.8
C	2	16.78	11.7	12	V 71-51	2,335	139	12.0
C	3	14.12	10.8	5	CC 85-92	1,926	136	13.0
C	1	19.71	12.7	19	CO 421	1,829	93	7.0
C	2	14.12	14.5	6	CC 85-92	1,816	129	9.0
C	3	16.78	14.4	13	V 71-51	976	58	4.0
C	1	14.12	11.7	7	ND	1,331	94	8.1
C	2	19.7	11.8	1	ND	2,208	112	9.5
C	3	16.78	12.5	1	ND	1,226	73	5.8
C	1	14.12	12.2	8	ND	1,652	117	9.6
C	2	19.7	12.3	2	CC 85-92	2,046	104	8.5
C	3	16.78	12.8	3	CC 85-92	1,991	119	9.3
C	1	14.12	11.9	9	CC 85-92	1,711	121	10.2
C	2	19	12.3	3	CC 85-92	2,353	124	10.1
C	3	16.38	12.4	4	CC 85-92	1,633	100	8.0
C	1	14.12	12.3	10	RENOVACIO N	1,784	126	10.3
C	2	19	12.1	4	RENOVACIO N	1,840	97	8.0
C	3	16.38	12.1	5	RENOVACIO N	1,072	146	12.1
C	1	14.12	11.4	11	CC 85-92	1,601	113	10.0
B	2	4.62	11.7	6	CC 85-92	394	85	7.0
B	3	12.84	12	7	CC 85-92	1,489	116	10.0
B	1	4.62	16.4	7	CC 85-92	639	138	8.0
B	2	4.62	11.7	8	CC 85-92	342	74	6.0
B	3	12.84	14.3	8	CC 85-92	1,329	104	7.0
B	1	4.62	12.2	1	CC 85-92	400	87	7.0
B	2	12.82	12.3	9	CC 85-92	914	71	6.0
B	3	4.62	16.7	2	CC 85-92	601	130	7.8
B	1	12.84	12.7	10	CC 85-92	1,551	121	9.5
B	2	12.84	13	11	CC 85-92	1,629	127	9.8
B	3	4.62	12.8	3	CC 85-92	526	114	8.9
B	1	0	0	11	CC 85-92	1,268	0	0.0
A	2	7.07	11.6	7	CC 85-92	628	89	8.0
A	3	7.85	11.6	7	CC 85-92	640	82	7.0

Finc a	SUERT E	AREA NETA ha	EDAD (Meses)	# CORTE DE CEPA ACT	VARIEDAD	TNL CAÑA	TCH *	TCHM **
A	1	10.74	11.6	7	CC 85-92	1,316	123	11.0
A	2	7.85	16.3	8	CC 85-92	1,198	153	9.0
A	3	10.74	16.3	8	CC 85-92	2,022	188	12.0
A	1	7.85	11.9	9	CC 85-92	669	85	7.0
A	2	10.74	11.9	9	CC 85-92	1,310	122	10.0
A	3	7.07	13	1	CC 85-92	977	138	11.0
A	1	7.85	12.6	10	CC 85-92	808	103	8.0
A	2	10.74	12.5	10	CC 85-92	1,342	125	10.0
A	3	7.07	13.2	2	CC 85-92	942	133	10.1
A	1	7.85	12.4	11	CC 85-92	843	107	8.7
A	2	10.74	12.4	11	CC 85-92	1,396	130	10.5
A	3	7.07	14.6	3	CC 85-92	935	132	9.1
A	1	7.85	13.3	12	CC 85-92	909	116	8.7
A	2	10.74	13.3	12	CC 85-92	1,478	138	10.3
A	3	6.69	12.8	4	CC 85-92	722	108	8.4
A	1	6.79	12.3	13	CC 85-92	862	127	10.3
A	2	11.96	12.3	13	CC 85-92	122	120	9.8

* Tonelada por ha año

** Tonelada por ha mes

10.2 Ejemplo de Inventario Detallado del Proceso de Nivelación Ajustado en SimaPro

SimaPro 8.2.3.0	proceso	Fecha	Período:
Proyecto	Caña	:	
Allocation rules			
System description	Ecoinvent v3		
FACTOR CONSUMO COMBUSTIBLE			
Products			
Nivelacion {CA-QC} sowing Alloc Def, U_Valle	1	ha	100 no definido Agricultural\Transformation
Avoided products			
Resources			

Materials/fuels						
Diesel {RoW} market for Alloc Def, U	6,3	kg	Reg. normal	1,521	(1,4,5,5,1,na)	
Tractor, 4-wheel, agricultural {GLO} market for Alloc Def, U	0,596	kg	Reg. normal	1,521	(1,4,5,5,1,na)	
Agricultural machinery, unspecified {GLO} market for Alloc Def, U	0,966	kg	Reg. normal	1,521	(1,4,5,5,1,na)	
Shed {GLO} market for Alloc Def, U	0,005	m2	Reg. normal	3,232	(1,4,5,5,1,na)	
Electricity/heat						
Emissions to air						
Carbon dioxide, fossil	low. pop.	19,63	kg	Reg. normal	1,633	(1,2,5,5,3,na)
Nickel	low. pop.	4E-07	kg	Reg. normal	5,331	(1,2,5,5,3,na)
Benzo(a)pyrene	low. pop.	2E-07	kg	Reg. normal	5,331	(1,2,5,5,3,na)
Cadmium	low. pop.	6E-08	kg	Reg. normal	5,331	(1,2,5,5,3,na)
NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	low. pop.	0,021	kg	Reg. normal	1,785	(1,4,5,5,1,na)
Carbon monoxide, fossil	low. pop.	0,024	kg	Reg. normal	5,292	(1,4,5,5,1,na)
Copper	low. pop.	1E-05	kg	Reg. normal	5,331	(1,2,5,5,3,na)
Ammonia	low. pop.	1E-04	kg	Reg. normal	1,883	(1,2,5,5,3,na)
Methane, fossil	low. pop.	8E-04	kg	Reg. normal	1,883	(1,2,5,5,3,na)
Particulates, < 2.5 um	low. pop.	0,021	kg	Reg. normal	3,321	(1,2,5,5,3,na)
Chromium	low. pop.	3E-07	kg	Reg. normal	5,331	(1,2,5,5,3,na)
Sulfur dioxide	low. pop.	0,006	kg	Reg. normal	1,633	(1,2,5,5,3,na)
Benzene	low. pop.	5E-05	kg	Reg. normal	1,883	(1,2,5,5,3,na)
PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons	low. pop.	2E-05	kg	Reg. normal	3,321	(1,2,5,5,3,na)
Nitrogen oxides	low. pop.	0,28	kg	Reg. normal	1,785	(1,4,5,5,1,na)
Dinitrogen monoxide	low. pop.	8E-04	kg	Reg. normal	1,883	(1,2,5,5,3,na)
Selenium	low. pop.	6E-08	kg	Reg. normal	1,883	(1,2,5,5,3,na)
Zinc	low. pop.	6E-06	kg	Reg. normal	5,331	(1,2,5,5,3,na)
Emissions to water						
Emissions to soil						
Lead	agricultural	1E-06	kg	Reg. normal	1,785	(1,4,5,5,1,na)
Zinc	agricultural	9E-04	kg	Reg. normal	1,785	(1,4,5,5,1,na)
Cadmium	agricultural	3E-07	kg	Reg. normal	1,785	(1,4,5,5,1,na)

10.3 Impactos Ambientales de Punto Medio Para una Hectarea de Caña en Plantilla (Recipe Midpoint (H) V1.12 / Europe Recipe H)

Categoría de impacto	Unidad	Total	Preparación_lote _plantilla	Siembra	Riego	Fertilización	Control Arvenses	Cosecha
Climate change	kg CO ₂ eq	4,8E+03	6,1E+02	1,7E+02	3,6E+02	3,0E+03	2,9E+02	3,2E+02
Ozone depletion	kg CFC-11 eq	7,8E-04	1,1E-04	3,0E-05	4,8E-05	2,9E-05	5,2E-04	4,9E-05
Terrestrial acidification	kg SO ₂ eq	4,7E+01	4,8E+00	1,4E+00	2,4E+00	3,4E+01	2,5E+00	2,3E+00
Freshwater eutrophication	kg P eq	5,0E-01	7,2E-02	2,0E-02	7,8E-02	9,6E-02	1,7E-01	5,8E-02
Marine eutrophication	kg N eq	2,2E+00	2,8E-01	7,9E-02	1,3E-01	1,3E+00	3,3E-01	1,3E-01
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	5,7E+02	1,1E+02	3,0E+01	1,5E+02	3,5E+01	1,7E+02	7,5E+01
Photochemical oxidant formation	kg NMVOC	2,0E+01	7,6E+00	2,2E+00	3,2E+00	2,4E+00	1,2E+00	3,5E+00
Particulate matter formation	kg PM10 eq	1,1E+01	2,3E+00	6,7E-01	1,2E+00	5,0E+00	9,1E-01	1,2E+00
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	4,4E+01	4,1E-02	1,2E-02	3,1E-02	2,4E-02	4,4E+01	2,2E-02
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	4,3E+01	2,6E+00	7,4E-01	1,3E+01	9,4E-01	2,4E+01	2,6E+00
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	2,3E+01	2,6E+00	7,4E-01	1,1E+01	9,7E-01	5,3E+00	2,5E+00
Ionising radiation	kBq U235 eq	1,5E+02	4,3E+01	1,2E+01	2,1E+01	1,8E+01	3,2E+01	2,2E+01
Agricultural land occupation	m ² a	1,0E+04	7,5E+00	1,0E+04	4,5E+00	3,0E+00	1,7E+01	2,9E+01
Urban land occupation	m ² a	1,4E+01	1,9E+00	5,4E-01	2,2E+00	8,9E-01	2,4E+00	6,2E+00
Natural land transformation	m ²	1,9E+00	2,2E-01	6,2E-02	1,4E+00	3,8E-02	4,1E-02	1,0E-01
Water depletion	m ³	1,5E+03	1,9E+00	5,5E-01	1,5E+03	1,3E+00	3,7E+00	1,5E+00
Metal depletion	kg Fe eq	1,8E+02	3,7E+01	1,1E+01	5,1E+01	7,9E+00	3,0E+01	4,2E+01
Fossil depletion	kg oil eq	9,7E+02	2,1E+02	6,0E+01	1,0E+02	3,9E+02	1,0E+02	1,0E+02

10.4 Impactos Ambientales de Punto Medio para una Hectárea de Caña en Soca (RecipeMidpoint (H) V1.12 / Europe Recipe H)

Categoría de impacto	Unidad	Total	Preparación_lote _soca	Siembra	Riego	Fertilización	Control Arvenses	Cosecha
Climate change	kg CO ₂ eq	4,4E+03	2,2E+02	1,7E+02	3,6E+02	3,0E+03	2,9E+02	3,2E+02
Ozone depletion	kg CFC-11 eq	7,2E-04	3,8E-05	3,0E-05	4,8E-05	2,9E-05	5,2E-04	4,9E-05
Terrestrial acidification	kg SO ₂ eq	4,4E+01	1,7E+00	1,4E+00	2,4E+00	3,4E+01	2,5E+00	2,3E+00
Freshwater eutrophication	kg P eq	4,5E-01	2,6E-02	2,0E-02	7,8E-02	9,6E-02	1,7E-01	5,8E-02
Marine eutrophication	kg N eq	2,1E+00	9,8E-02	7,9E-02	1,3E-01	1,3E+00	3,3E-01	1,3E-01
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	5,0E+02	3,8E+01	3,0E+01	1,5E+02	3,5E+01	1,7E+02	7,5E+01
Photochemical oxidant formation	kg NMVOC	1,5E+01	2,7E+00	2,2E+00	3,2E+00	2,4E+00	1,2E+00	3,5E+00
Particulate matter formation	kg PM10 eq	9,8E+00	8,4E-01	6,7E-01	1,2E+00	5,0E+00	9,1E-01	1,2E+00
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	4,4E+01	1,5E-02	1,2E-02	3,1E-02	2,4E-02	4,4E+01	2,2E-02
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	4,1E+01	9,3E-01	7,4E-01	1,3E+01	9,4E-01	2,4E+01	2,6E+00
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	2,2E+01	9,3E-01	7,4E-01	1,1E+01	9,7E-01	5,3E+00	2,5E+00
Ionising radiation	kBq U235 eq	1,2E+02	1,5E+01	1,2E+01	2,1E+01	1,8E+01	3,2E+01	2,2E+01
Agricultural land occupation	m ² a	1,0E+04	2,7E+00	1,0E+04	4,5E+00	3,0E+00	1,7E+01	2,9E+01
Urban land occupation	m ² a	1,3E+01	6,7E-01	5,4E-01	2,2E+00	8,9E-01	2,4E+00	6,2E+00
Natural land transformation	m ²	1,8E+00	7,7E-02	6,2E-02	1,4E+00	3,8E-02	4,1E-02	1,0E-01
Water depletion	m ³	1,5E+03	6,9E-01	5,5E-01	1,5E+03	1,3E+00	3,7E+00	1,5E+00
Metal depletion	kg Fe eq	1,5E+02	1,3E+01	1,1E+01	5,1E+01	7,9E+00	3,0E+01	4,2E+01
Fossil depletion	kg oil eq	8,3E+02	7,4E+01	6,0E+01	1,0E+02	3,9E+02	1,0E+02	1,0E+02

10.5 Caracterización a nivel medio (Goedkoop, 2009)

10.5.1 El Factor de agotamiento del ozono

El factor de caracterización del agotamiento de la capa de ozono explica la destrucción de la capa de ozono estratosférica por emisiones antropogénicas de sustancias que agotan la capa de ozono (SAO). La unidad es equivalente a año / kg de CFC-11.

10.5.2 Toxicidad humana y ecotoxicidad

El factor de caracterización de la toxicidad y ecotoxicidad humana explica la persistencia medioambiental (destino) y la acumulación en la cadena alimentaria humana (exposición) y la toxicidad (efecto) de una sustancia química. La unidad es año / kg 1,4-diclorobenceno (14DCB).

10.5.3 Radiación

El factor de caracterización de la radiación ionizante explica el nivel de exposición. La unidad es equivalente a año / kg de uranio 235.

10.5.4 Formación e oxidantes fotoquímicos

El factor de caracterización de la formación de oxidantes fotoquímicos se define como el cambio marginal en la concentración europea media de ozono en 24 horas (dCO_3 en $kg \cdot m^{-3}$) debido a un cambio marginal en la emisión de la sustancia x (dM_x en $kg \cdot año^{-1}$). La unidad es COVNM año / kg.

10.5.5 Formación de partículas

El factor de caracterización de la formación de partículas es la fracción de entrada de PM10. La unidad es equivalente a año / kg de PM10.

10.5.6 Cambio Climático

El factor de caracterización del cambio climático es el potencial de calentamiento global.

La unidad es equivalente a años / kg de CO₂.

10.5.7 Ocupación de suelo agrícola y urbano

La cantidad de tierra agrícola o urbana ocupada durante un tiempo determinado. La

unidad es m² * año.

10.5.8 Transformación de tierras naturales

La cantidad de tierra natural transformada y ocupada durante un tiempo determinado. La

unidad es m² * año.

10.5.9 Eutrofización marina

El factor de caracterización de la eutrofización marina explica la persistencia

medioambiental (destino) de la emisión de nutrientes que contienen nitrógeno. La unidad es año / kg N a equivalentes de agua dulce.

10.5.10 Eutrofización de agua dulce

El factor de caracterización de la eutrofización del agua dulce explica la persistencia

medioambiental (destino) de la emisión de nutrientes que contienen P. La unidad es yr / kg P a equivalentes de agua dulce.

10.5.11 Agotamiento de minerales y combustibles fósiles

El factor de caracterización del agotamiento de los fósiles es la cantidad de combustible fósil extraído, en función del valor calorífico inferior. La unidad es kg equivalente de petróleo (1 kg de petróleo equivalente tiene un poder calorífico inferior de 42 MJ).

10.5.12Agotamiento de minerales

El factor de caracterización del agotamiento de los minerales es la disminución de la ley.

La unidad es equivalente en kg de Hierro (Fe).

10.5.13Agotamiento de agua dulce

El factor del agotamiento del agua dulce es la cantidad de consumo de agua dulce. La

unidad es m³.

10.6 Impactos ambientales de punto medio por tonelada de caña producida en diferentes países del mundo según SimaPro (ReCiPe Midpoint (H) V1.12 / Europe Recipe H)

		Argentina	Australia and New Zealand	Brasil	China	Colombia	Indonesia	India	Pakistan	Sudan	Thailand	United States	Venezuela	Estadísticas		
Categoría de impacto	Unidad	Sugar cane, at farm/AR Mass	Sugar cane, at farm/AU Mass	Sugar cane, at farm/BR Mass	Sugar cane, at farm/CN Mass	Sugar cane, at farm/CO Mass	Sugar cane, at farm/ID Mass	Sugar cane, at farm/IN Mass	Sugar cane, at farm/PK Mass	Sugar cane, at farm/SD Mass	Sugar cane, at farm/TH Mass	Sugar cane, at farm/US Mass	Sugar cane, at farm/VE Mass	Mínimo	Máximo	Promedio
Climate change	kg CO2 eq	1,1E+02	5,1E+01	2,0E+02	8,1E+01	4,5E+01	1,1E+02	6,4E+01	1,1E+02	3,8E+01	7,8E+01	5,4E+01	7,2E+01	3,8E+01	2,0E+02	8,4E+01
Ozone depletion	kg CFC-11 eq	5,0E-08	8,9E-08	9,0E-08	1,9E-07	6,2E-08	1,6E-07	8,9E-08	1,0E-07	3,5E-08	5,3E-08	1,5E-07	9,7E-08	3,5E-08	1,9E-07	9,7E-08
Terrestrial acidification	kg SO2 eq	4,0E-01	3,7E-01	4,5E-01	1,5E+00	3,9E-01	8,3E-01	6,8E-01	1,1E+00	1,1E-01	2,4E-01	6,6E-01	8,2E-01	1,1E-01	1,5E+00	6,3E-01
Freshwater eutrophication	kg P eq	2,1E-03	5,5E-02	3,5E-02	1,3E-01	4,8E-02	6,4E-02	4,0E-02	5,0E-02	1,6E-02	2,1E-02	4,3E-02	7,4E-02	2,1E-03	1,3E-01	4,8E-02
Marine eutrophication	kg N eq	1,9E+00	1,9E+00	2,0E+00	3,0E+00	1,9E+00	2,3E+00	2,2E+00	2,7E+00	1,7E+00	1,8E+00	2,1E+00	2,2E+00	1,7E+00	3,0E+00	2,1E+00
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	2,3E+00	3,7E+00	4,2E+00	6,3E+00	4,5E+00	5,4E+00	4,8E+00	5,5E+00	3,4E+00	3,9E+00	4,4E+00	4,8E+00	2,3E+00	6,3E+00	4,4E+00
Photochemical oxidant formation	kg NMVOC	5,1E-02	5,3E-02	5,3E-02	7,9E-02	4,4E-02	7,2E-02	6,0E-02	7,6E-02	3,6E-02	5,0E-02	6,1E-02	6,4E-02	3,6E-02	7,9E-02	5,8E-02
Particulate matter formation	kg PM10 eq	6,1E-02	6,0E-02	6,9E-02	2,1E-01	6,1E-02	1,2E-01	1,0E-01	1,6E-01	2,1E-02	4,1E-02	9,9E-02	1,2E-01	2,1E-02	2,1E-01	9,4E-02
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	6,6E-01	1,8E+00	6,1E-01	2,4E+00	5,3E-01	2,6E+00	2,4E+00	3,0E+00	1,6E+00	2,2E+00	2,2E-01	7,3E-01	2,2E-01	3,0E+00	1,6E+00
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	4,3E-01	1,0E+00	4,0E-01	1,3E+00	3,4E-01	1,4E+00	1,3E+00	1,6E+00	8,6E-01	1,2E+00	1,7E-01	4,8E-01	1,7E-01	1,6E+00	8,6E-01
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	5,2E-02	9,7E-02	5,0E-02	1,4E-01	4,4E-02	1,5E-01	1,4E-01	1,7E-01	9,1E-02	1,3E-01	3,4E-02	6,1E-02	3,4E-02	1,7E-01	9,6E-02
Ionising radiation	kBq U235 eq	6,1E-02	1,1E-01	1,1E-01	2,3E-01	7,5E-02	1,9E-01	1,1E-01	1,2E-01	4,3E-02	6,4E-02	1,8E-01	1,2E-01	4,3E-02	2,3E-01	1,2E-01
Agricultural land occupation	m2a	1,4E+02	1,3E+02	1,3E+02	1,5E+02	1,1E+02	1,6E+02	1,5E+02	1,9E+02	9,9E+01	1,3E+02	1,3E+02	1,5E+02	9,9E+01	1,9E+02	1,4E+02
Water depletion	m3	2,7E+01	5,3E+01	5,4E+00	6,4E+00	8,4E+00	4,6E+01	1,4E+02	2,3E+02	2,3E+02	4,3E+01	2,5E+01	4,7E+01	5,4E+00	2,3E+02	7,1E+01
Metal depletion	kg Fe eq	3,5E-03	7,8E-03	5,3E-03	1,8E-02	5,8E-03	1,1E-02	8,5E-03	1,2E-02	2,5E-03	3,9E-03	7,6E-03	9,8E-03	2,5E-03	1,8E-02	7,9E-03
Fossil depletion	kg oil eq	2,9E+00	3,3E+00	3,2E+00	8,0E+00	2,6E+00	5,6E+00	4,6E+00	6,4E+00	1,7E+00	2,4E+00	3,9E+00	4,4E+00	1,7E+00	8,0E+00	4,1E+00

10.7 Anexo fotográfico (Fuente Propia caso de estudio)



Foto 1: Tractor enlantado con Subsolador utilizado para descompactar el suelo, logrando infiltración de agua y retención de humedad



Foto 2: Buldozer o Tractor de oruga utilizado en la adecuación/nivelación de suelos para la siembra. También se usa en la elaboración de cabeceras y drenajes en cada suerte.



Foto 3. Estación de bombeo que deriva aguas del rio cauca a canal abierto por tuberías



Foto 4: compuerta de derivación de aguas a canales contiguos a cada suerte para instalación de riego por ventanas



Foto 5: Reservorio alimentado por aguas lluvias y por medio de las compuertas que derivan aguas del rio cauca



Foto 6: Reservorio 2 alimentado por aguas lluvias y por medio de las compuertas que derivan aguas del rio cauca



Foto 7: Definición de surcos para siembra de esquejes



Foto 8: Definición de surcos en presencia de residuos de cosecha



Foto 9: Plantilla de 3 meses de edad



Foto 10: Riego por gravedad en surcos



Foto 11: Cultivo de caña de 5 meses de edad



Foto 12: Avioneta realizando aplicación de madurantes en el cultivo de caña de azúcar